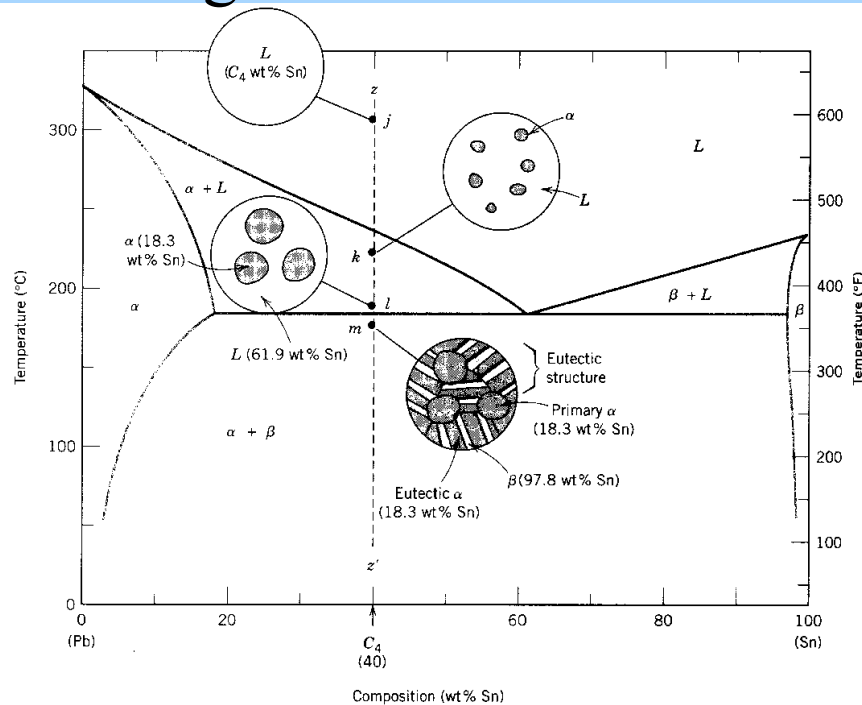


Les mélanges : Diagrammes de phases

Chapitre 5 des *Matériaux*

1. Qu'a-t-on vu jusqu'à maintenant?
2. Les métaux purs sont généralement mous. C'est pour cela que nous devons faire des alliages.
3. Peut-on modifier les propriétés d'un matériau d'une composition donnée?
4. Il faut donc comprendre :
 - a. La microstructure en fonction de la composition.
 - b. Comment changer la microstructure?
5. Les diagrammes de phase sont utiles pour cela.

Diagramme de Phases



Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-3

Contenu

- **Introduction**
- **Définitions :**
 - Composant, phase, constituant, limite de solubilité.
- **Diagrammes binaires d'équilibre :**
 - Interprétation,
 - Règle des phases,
 - Règle des bras de levier, des segments inverses,
 - Transformations eutectiques, peritectiques, eutectoides,
 - Formation de la microstructure dans les alliages.
- **Système fer-carbone :**
 - Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C,
 - Formation des microstructures : alliages Fer-carbone.
- **Diffusion**
- **Diagrammes hors équilibre**

Motivations

- Comprendre la formation des structures des matériaux.
- Certaines propriétés des matériaux (dureté, résistances) sont fonction de leur microstructure.
- Comprendre les diagrammes d'équilibre afin de mettre sur pieds des traitements thermiques.

Objectifs

- Interpréter les diagrammes d'équilibre simples.
- Déterminer les phases présentes (composition et fraction) à une température donnée.
- Sur un diagramme d'équilibre binaire, localiser la température et la composition des transformations de phase.
- Connaître la microstructure d'équilibre d'un alliage.

Contenu

- Introduction
- **Définitions :**
 - Composant, phase, constituant, limite de solubilité.
- Diagrammes binaires d'équilibre :
 - Interprétation,
 - Règle des phases,
 - Règle des bras de levier, des segments inverses,
 - Transformations eutectiques, peritectiques, eutectoides,
 - Formation de la microstructure dans les alliages.
- Système fer-carbone :
 - Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C,
 - Formation des microstructures : alliages Fer-carbone.
- Diffusion
- Diagrammes hors équilibre

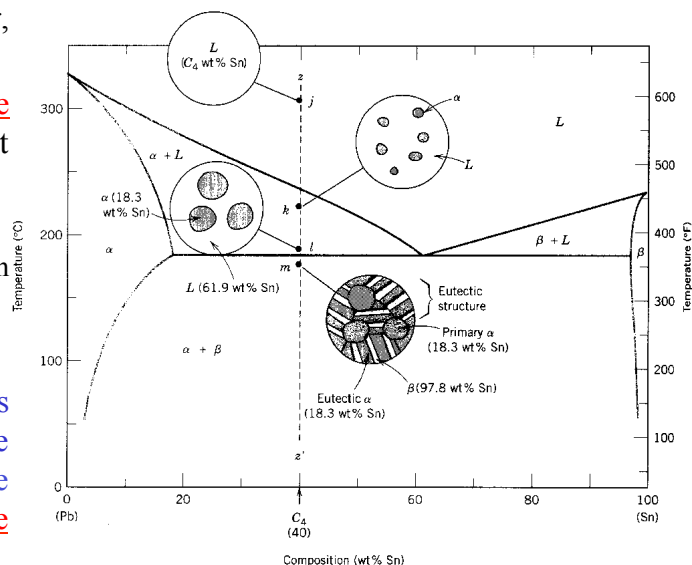
Définitions

Composant :

- Élément (métaux purs) : fer, cuivre, soufre.
- Composé **de composition fixe** à partir duquel un alliage est constitué :
 - Na₂O, SiO₂, Fe₃C,
 - Cu et Zn dans le laiton (alliage Cu-Zn).

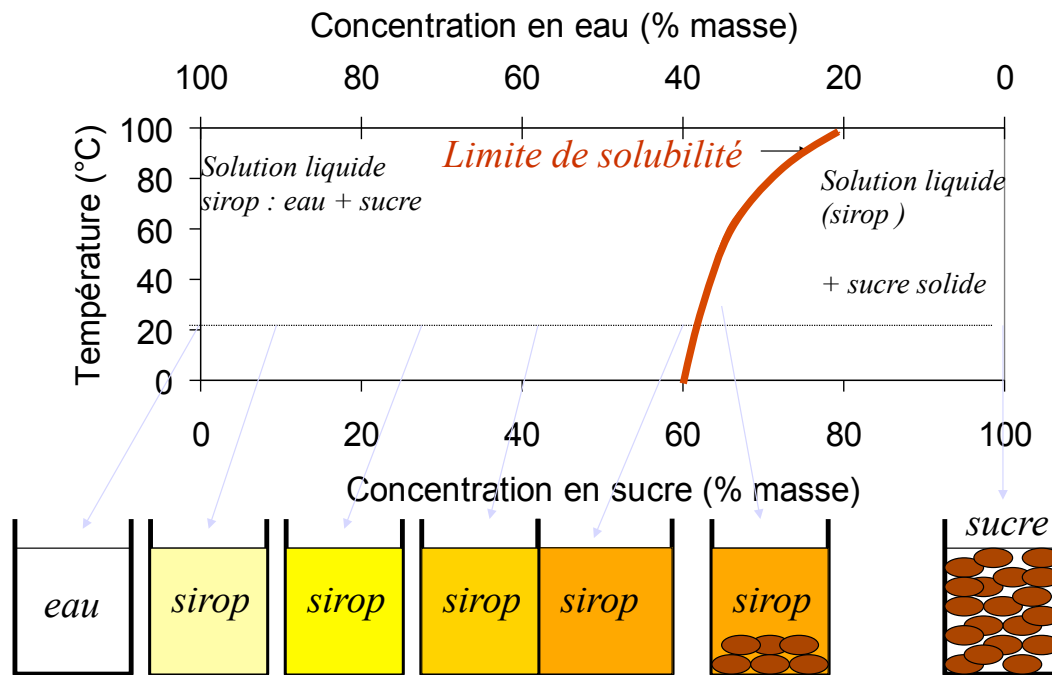
Phase

- Région ou ensemble des régions d'un corps ayant une même structure et un même arrangement atomique (**partie homogène d'un corps**).
- Ex. : mélange eau + alcool : 2 composants / 1 phase



Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

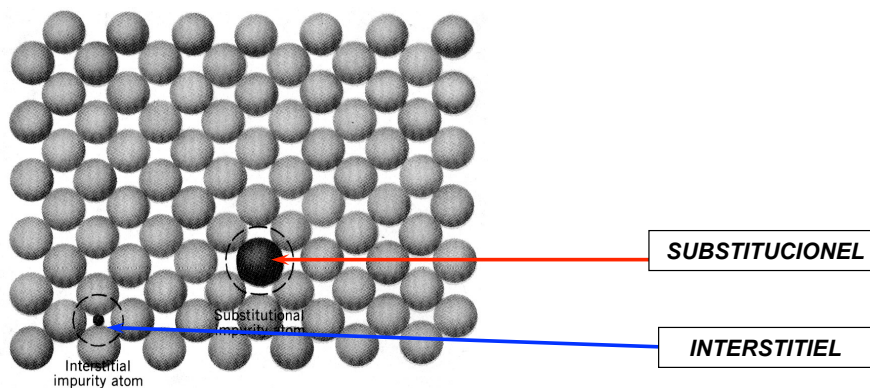
Solubilité du sucre dans l'eau



MEC-200 – Technologie des matériaux

9-9

Solution solide



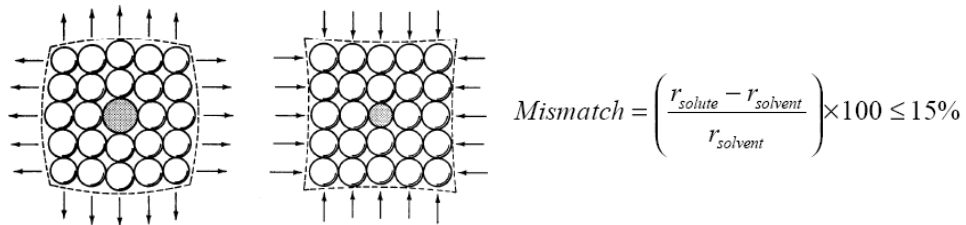
Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-10

Règles de miscibilité

- a. Le diamètre atomique des éléments A et B ne doit pas différer de plus de 15 %.



- b. Les deux éléments A et B doivent avoir la même structure cristalline.
c. Les valences des deux éléments doivent être égales.
d. L'électronégativité de A et celle de B doivent être semblables.

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-11

Composition d'un alliage

- CONCENTRATION EN MASSE

$$C_A = \frac{m_A}{m_A + m_B} \times 100\%$$

ou m_i est la masse du composant i .

- CONCENTRATION ATOMIQUE

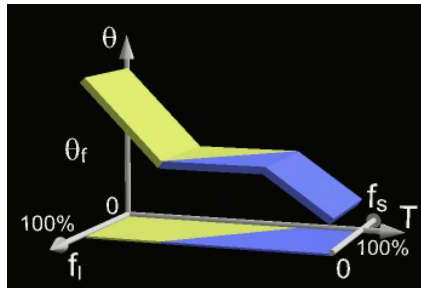
$$C_A^{at} = \frac{N_A}{N_A + N_B} \times 100\%$$

ou N_i est le nombre de i .

Solidification

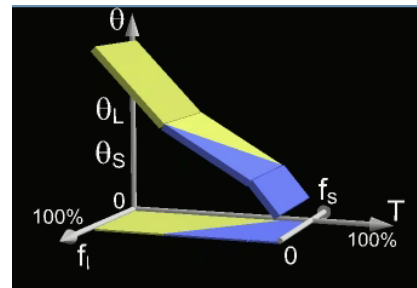
Solidification d'un corps pur

- 1 - $T > \theta_f \Rightarrow 100\%$ de liquide
- 2 - $T = \theta_f \Rightarrow$ solidification à température constante
- 3 - $T < \theta_f \Rightarrow 100\%$ de solide



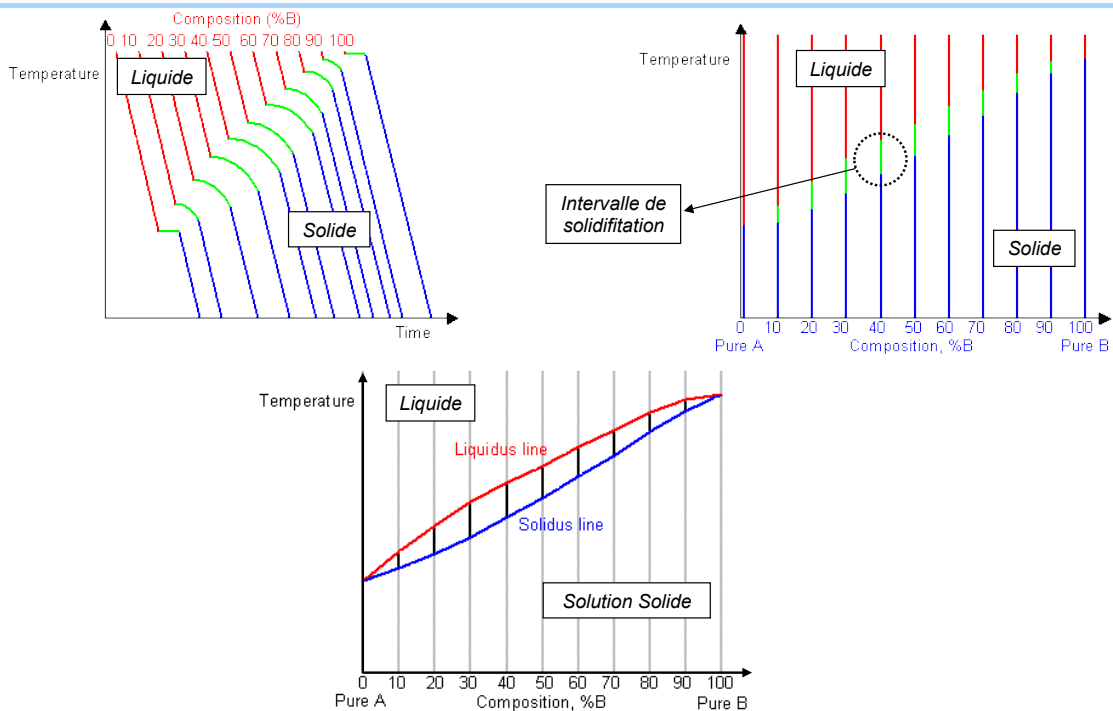
Solidification d'un mélange de plusieurs composants

- 1 - $T > \theta_f \Rightarrow 100\%$ de liquide
- 2 - $T = \theta_l \Rightarrow$ début de la solidification (1^{er} germe de solide)
- 3 - $T = \theta_f \Rightarrow$ fin de la solidification (dernier germe de liquide)
- 3 - $T < \theta_f \Rightarrow 100\%$ de solide



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

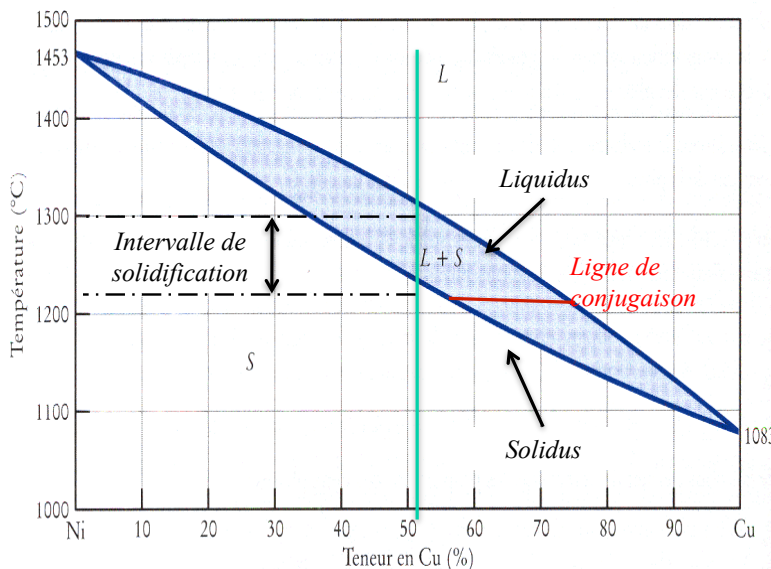
Solidification



- Introduction
- Définitions :
 - Composant, phase, constituant, limite de solubilité.
- **Diagrammes binaires d'équilibre**
 - Interprétation,
 - Règle des phases,
 - Règle des bras de levier, des segments inverses,
 - Transformations eutectiques, peritectiques, eutectoides,
 - Formation de la microstructure dans les alliages.
- Système fer-carbone :
 - Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C.
 - Formation des microstructures : alliages Fer-carbone.
- Diffusion
- Diagrammes hors équilibre

2 éléments complètement miscibles

Le système Cu-Ni



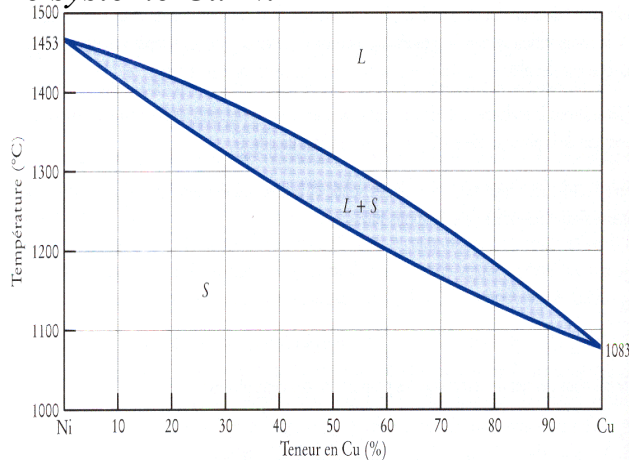
Séparation des domaines

- Limite (L/L+S) = liquidus
- Limites (S/L+S) = solidus

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

2 éléments complètement miscibles

Le système Cu-Ni



Compon.	Rayon atomique	Mis-match	Estrut. crist.	Valence	Eletro-neg.
Ni	0,125 nm	2,3%	CFC	2+	1,9
Cu	0,128 nm	2,3%	CFC	1+	1,9

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-17



- Règles de Hume-Rothery
- Différence de rayon atomique < 15 %
- Structures cristallines identiques
- Valences égales
- Électro-négativités semblables

Règles des phases

$$V = N - P + 1$$

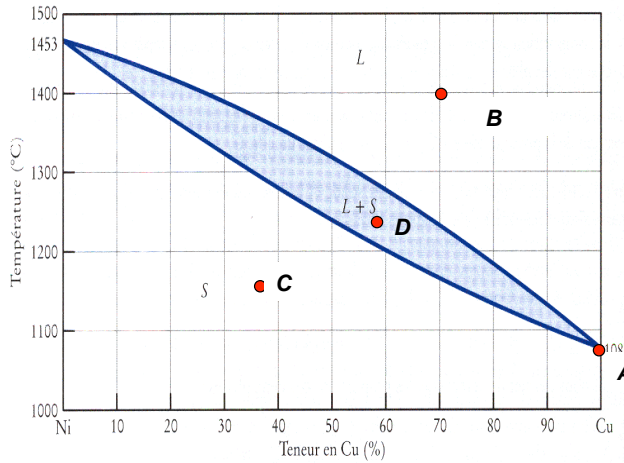
V = nombre de variables (température e compositions des phases)

N = nombre de composants

P = nombre de phases

2 éléments complètement miscibles

Le système Cu-Ni



$N = 1$

• $P=2$ $V=0$

$N = 2$

• $P=1$ la composition et la température sont deux variables indépendantes $V=2$.

• $P=2$, les trois variables C_1 , C_2 et température sont fixées dès que l'une des trois est imposée le système est monovariant.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-19

Règle des segments inverses Règle des bras de levier

Utilisée pour connaître la composition des phases

Bilan de masse

→ Soit W_L et W_α les fractions massiques des phases liquides et solides α .

→ Chaque composant du système peut être dans chacune des phases, en concentration C_L (dans le liquide) et C_α (dans le solide).

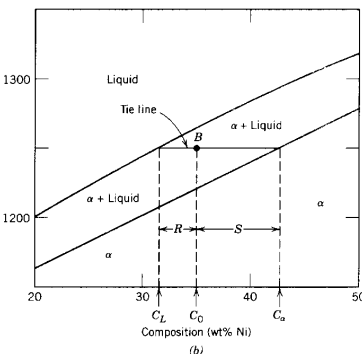
$$W_L + W_\alpha = 1 \rightarrow W_L = 1 - W_\alpha \quad (\text{eq. I})$$

$$W_L C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0 \quad (\text{eq. II})$$

$$(1 - W_\alpha) C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0$$

$$C_L - W_\alpha C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0$$

$$W_\alpha (C_\alpha - C_L) = C_0 - C_L$$



$$W_\alpha = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L}$$

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-20

Diagramme d'équilibre Cu-Ni

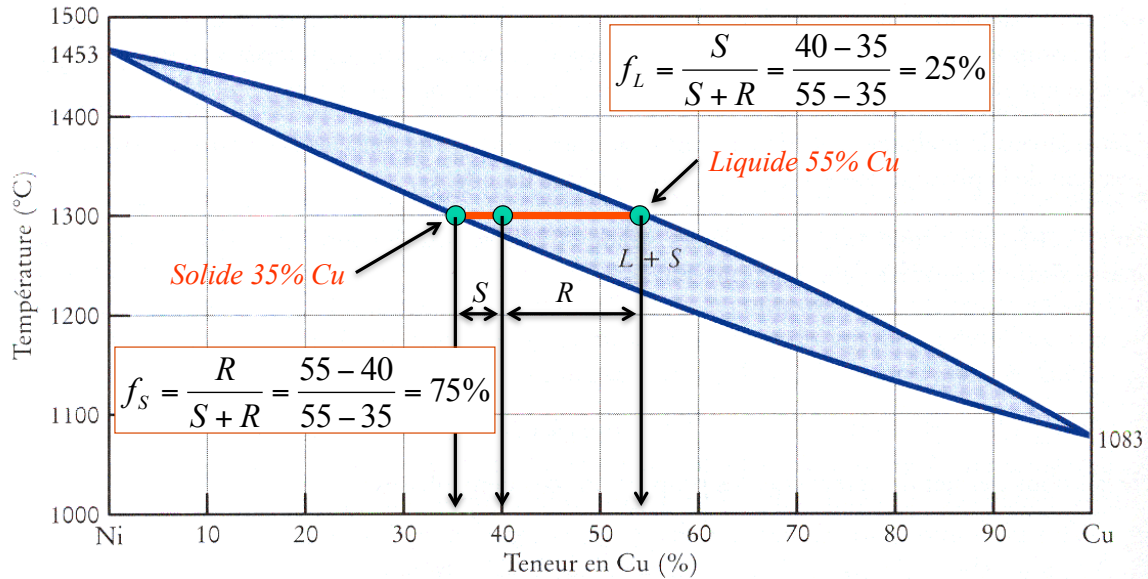


Figure 5.3 Diagramme d'équilibre Cu-Ni.

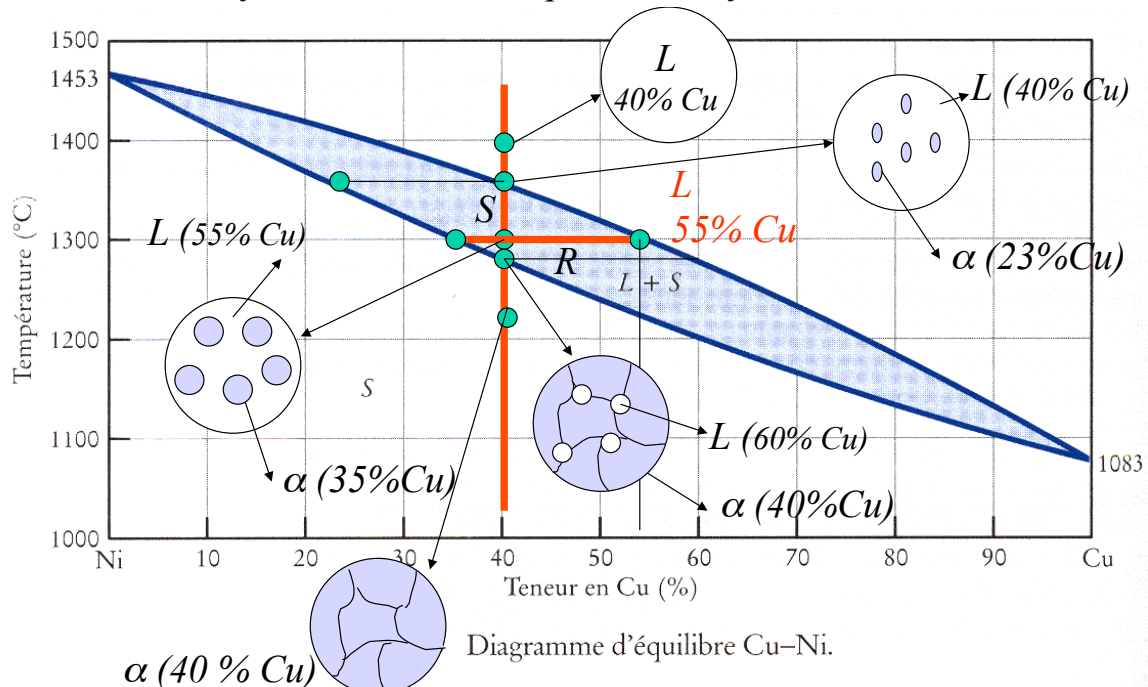
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-21

Formation de microstructure Cu-Ni

Refroidissement à l'équilibre : Refroidissement lent



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

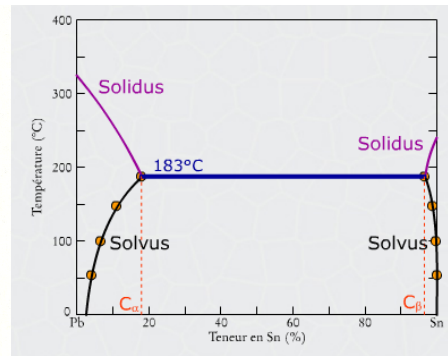
9-22

2 éléments partiellement miscibles

Solubilité partielle = apparition d'une deuxième phase à partir d'une concentration critique en fonction de la température.

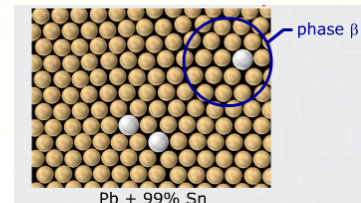
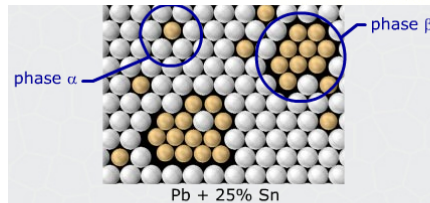
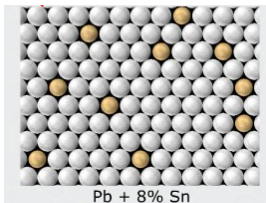
Solvus : ligne permettant de délimiter la solubilité partielle à l'état solide.

C_α et C_β concentration maximale pour former une solution solide.



β

Phase α



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

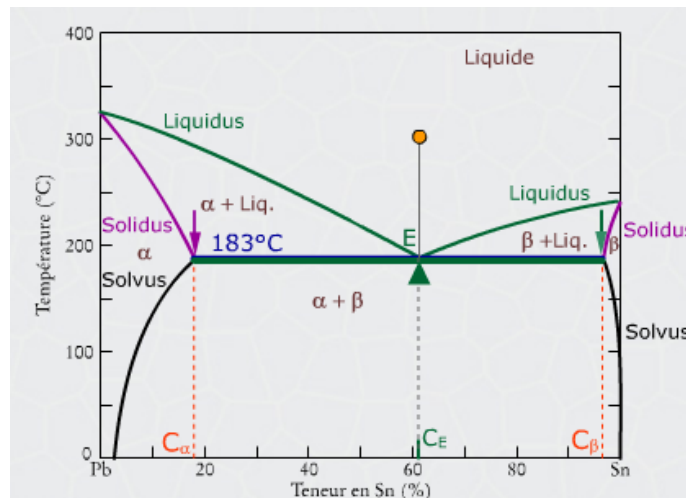
MEC-200 – Technologie des matériaux

9-23

2 éléments partiellement miscibles

Point Eutectique : Point invariant pour lequel une phase liquide est en équilibre avec 2 phases solides

Réaction eutectique : $L_E \Leftrightarrow \alpha + \beta$



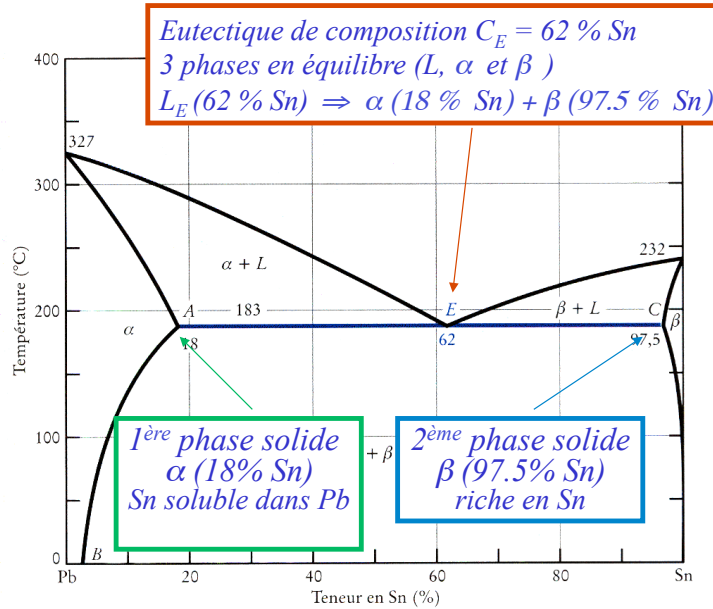
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

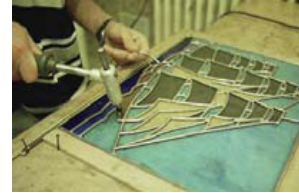
9-24

Eutectique

Le système Sn-Pb



Soudure à l'étain
(+ 40 % de plomb)



2 phases solides de structures différentes

- $\alpha = \text{CFC}$
- $\beta = \text{CC}$

3 domaines biphasés

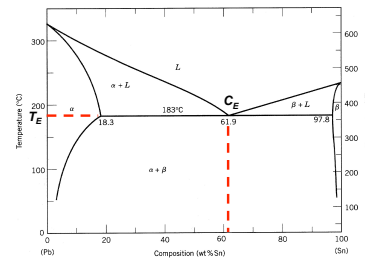
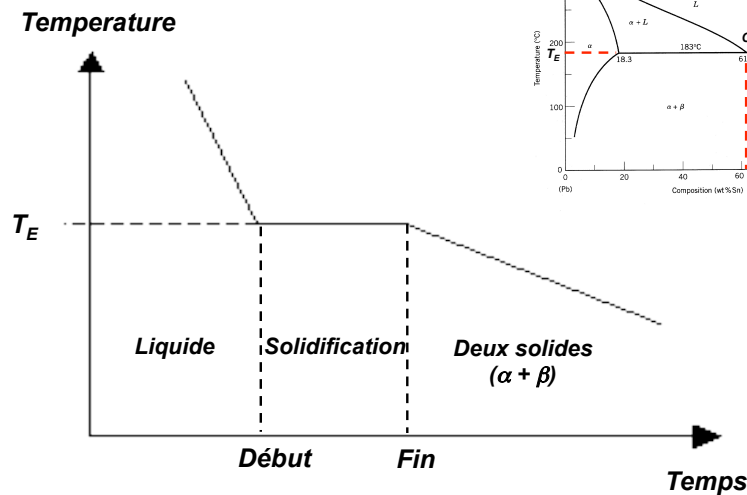
- $\alpha + L$
- $\beta + L$
- $\alpha + \beta$

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-25

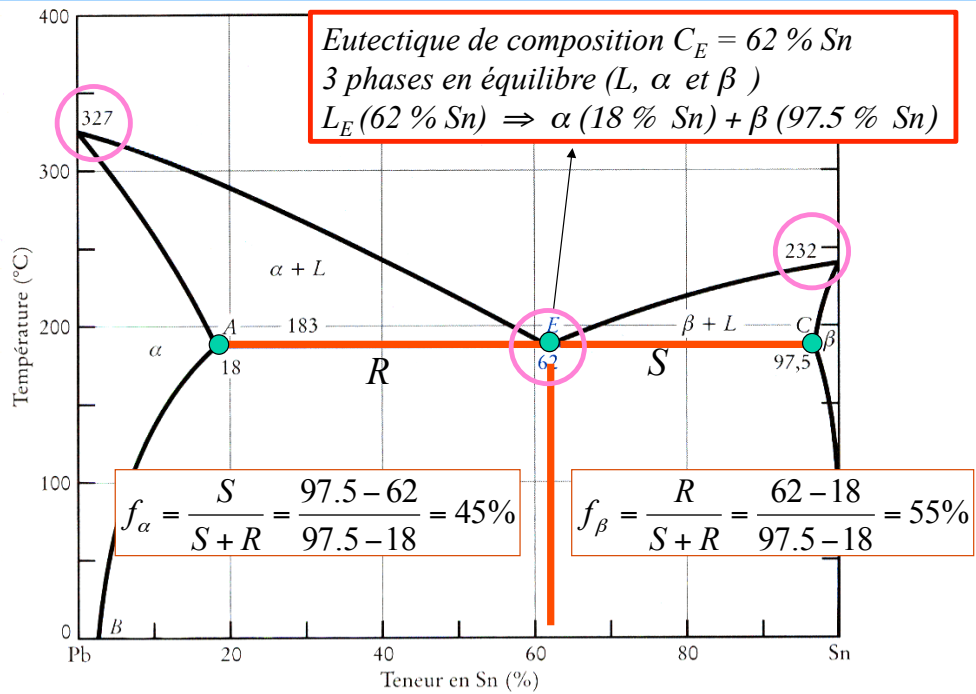
Pb-Sn : Solidification de l'eutectique



MEC-200 – Technologie des matériaux

9-26

Pb-Sn : Solidification de l'eutectique



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-27

Formation et croissance de l'eutectique

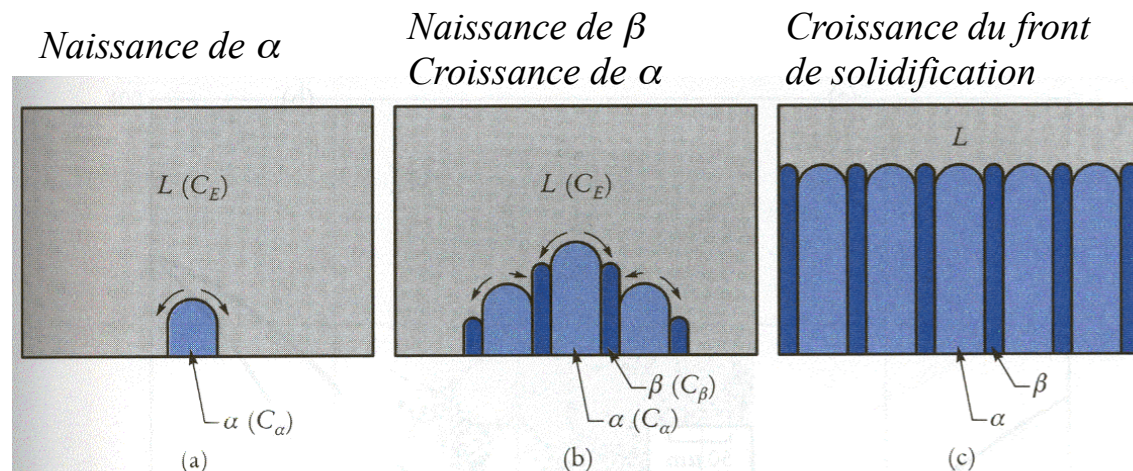


Figure 5.10 Schéma de la formation et de la croissance d'un constituant eutectique : a) formation, au sein du liquide de composition C_E , d'un germe de phase α de composition C_α . Les flèches représentent le rejet du soluté devant le germe α ($C_\alpha < C_E$) ; b) croissance latérale de l'eutectique par la formation de phase β ; c) croissance plane du front de solidification.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-28

Micrographie de l'eutectique Pb-Sn

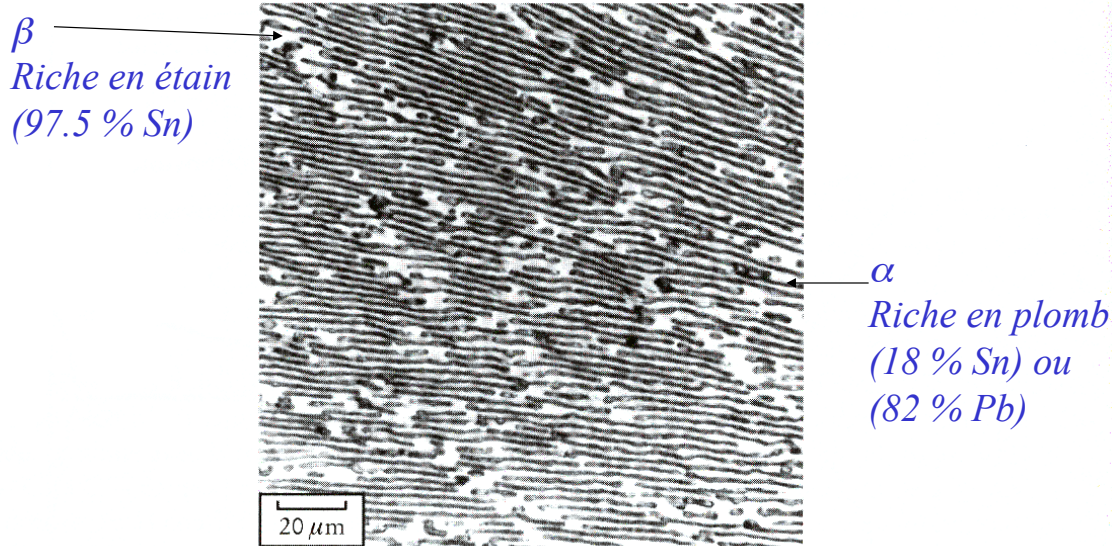


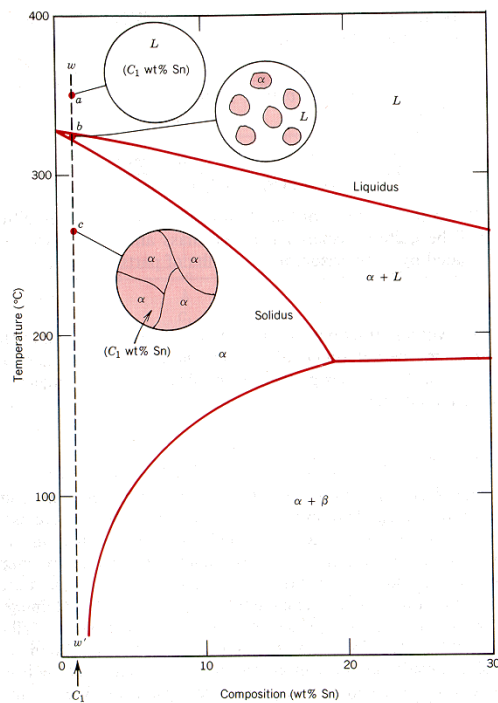
Figure 5.6 Micrographie de l'eutectique Pb-Sn. La phase α , riche en plomb, apparaît en gris foncé.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-29

Diagramme d'équilibre Pb-Sn

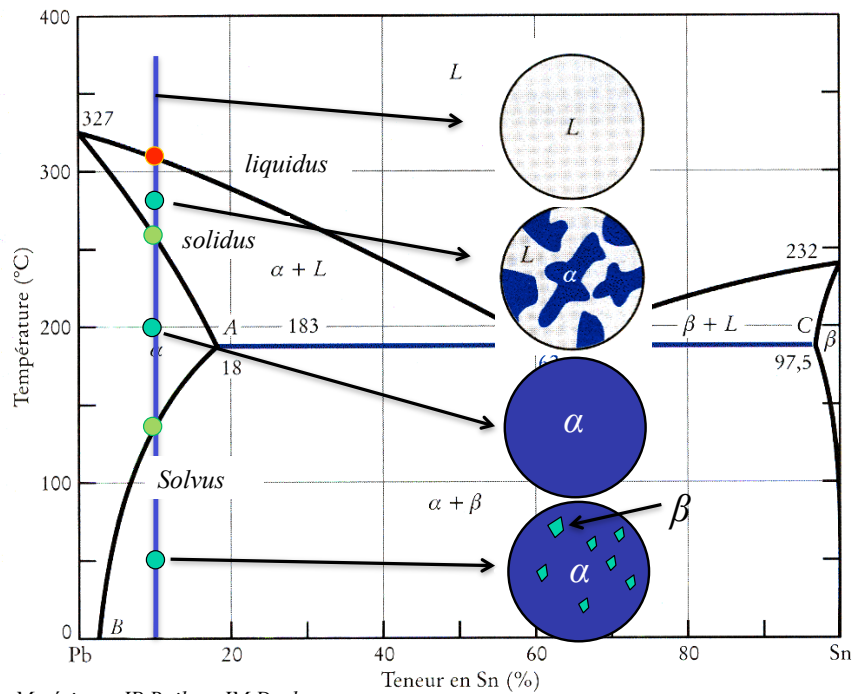


Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-30

Diagramme d'équilibre Pb-Sn

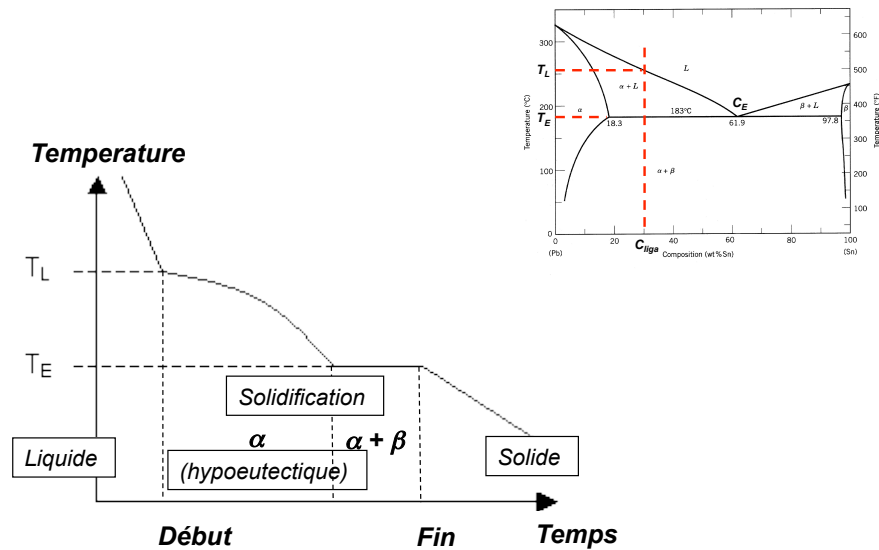


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-31

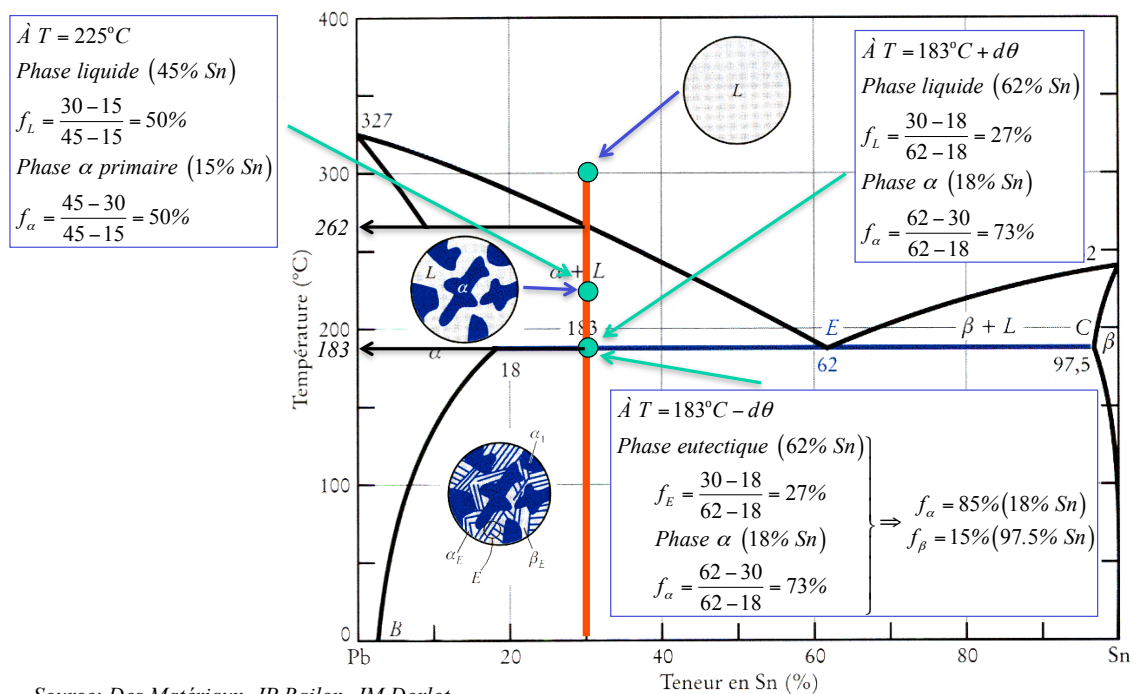
Diagramme d'équilibre Pb-Sn



MEC-200 – Technologie des matériaux

9-32

Pb-30 % Sn Alliage hypoeutectique

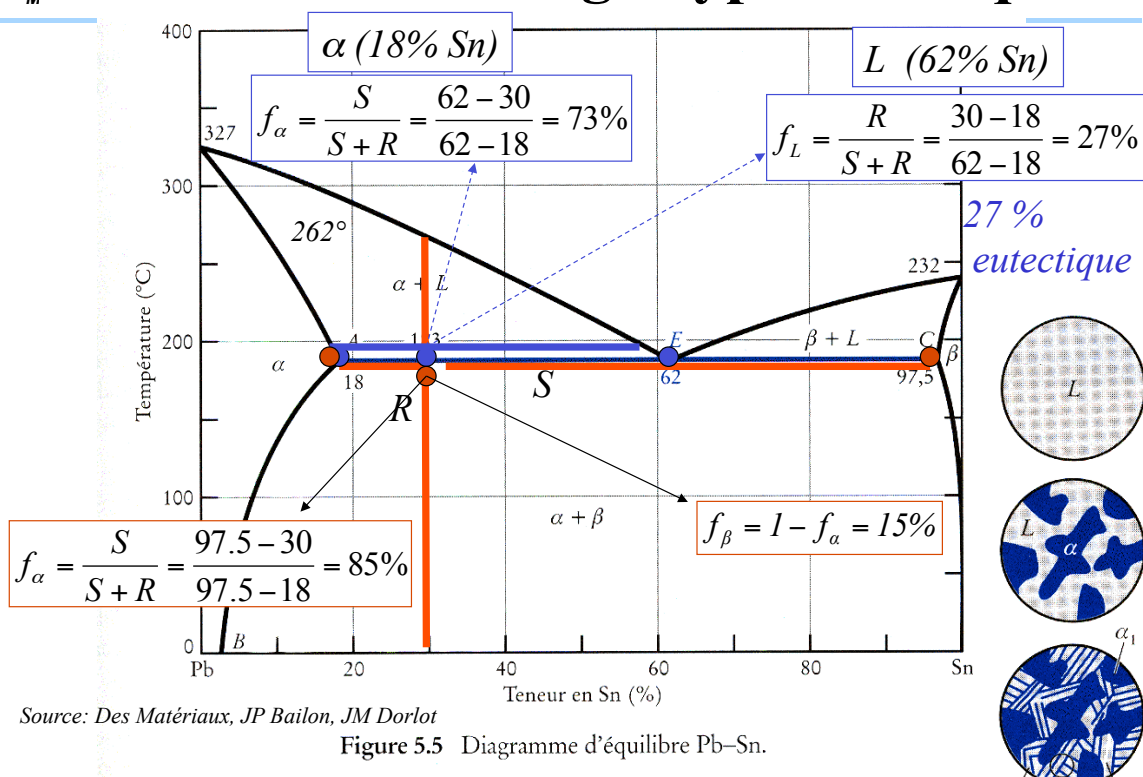


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-33

Pb-30 % Sn Alliage hypoeutectique



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Figure 5.5 Diagramme d'équilibre Pb–Sn.

Solidification de l'alliage Pb-30 % Sn

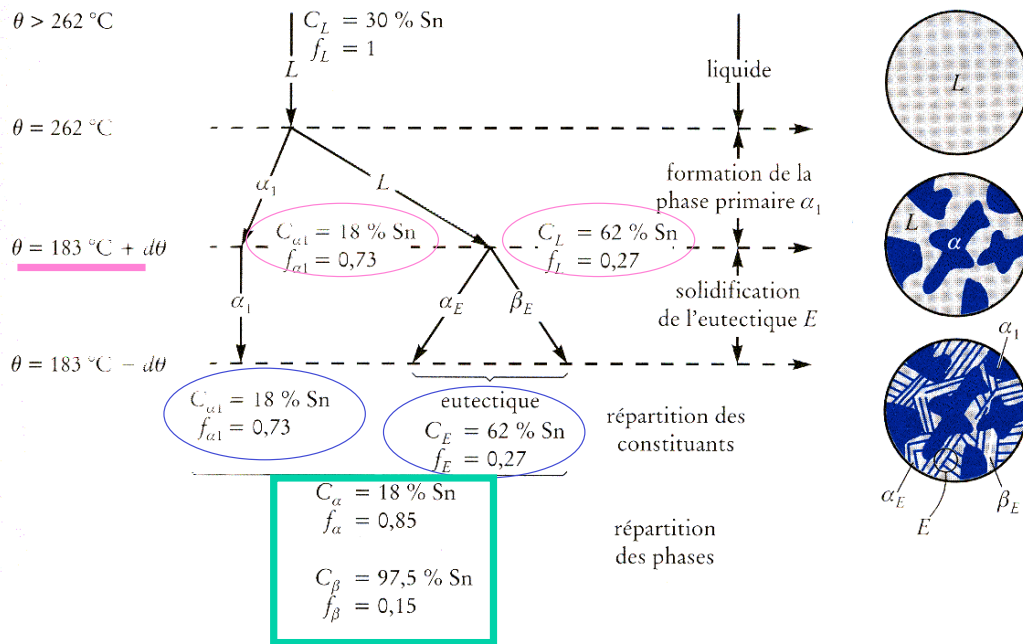


Figure 5.7 Schéma de la solidification d'un alliage Pb-30 % Sn.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

3-35

Micrographie Pb-30 % Sn hypoeutectique

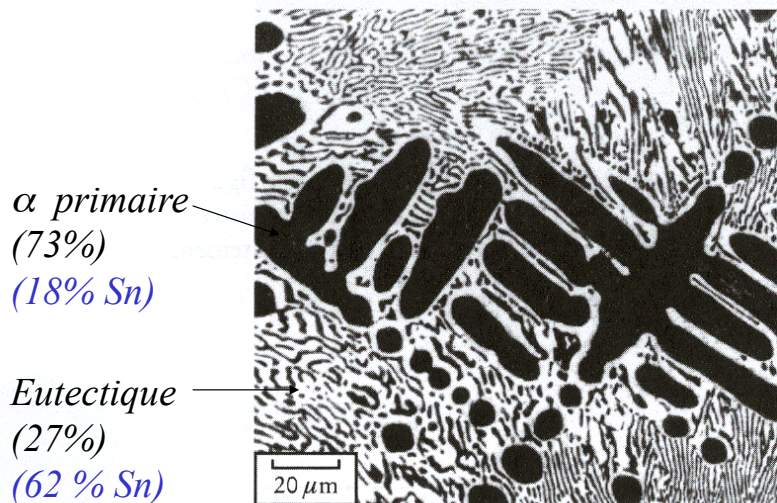
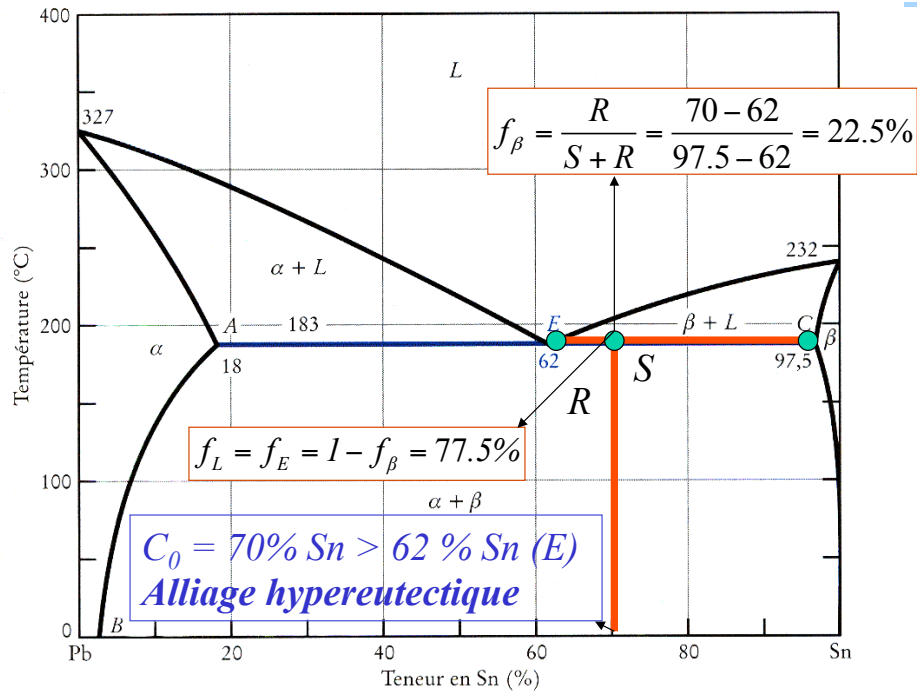


Figure 5.8 Micrographie d'un alliage Pb-30 % Sn. Le constituant α primaire forme des plages noires entourées d'eutectique.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

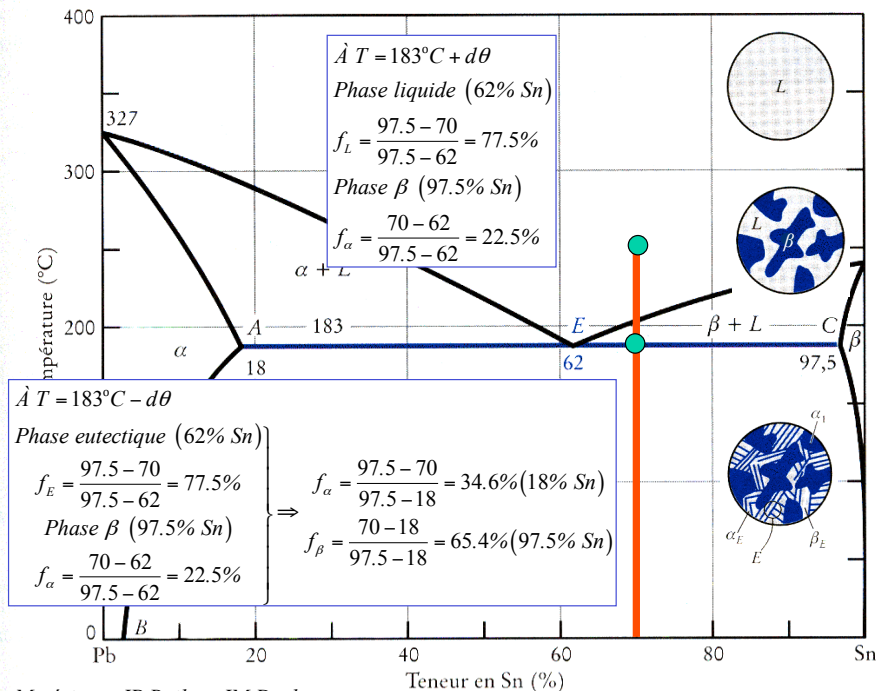
Pb-70 % Sn : alliage hyper eutectique



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

9-37

Pb-70 % Sn : alliage hyper eutectique



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

9-38

Micrographie de Pb-70 % Sn hypereutectique

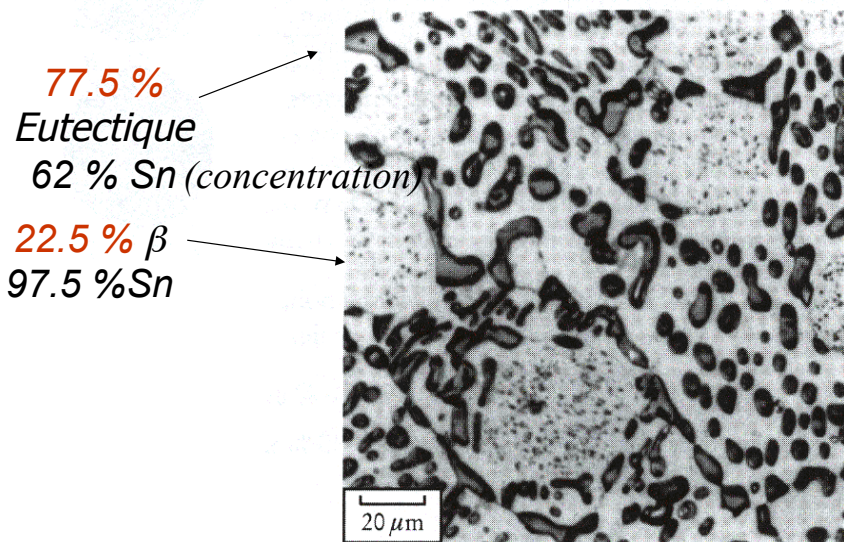


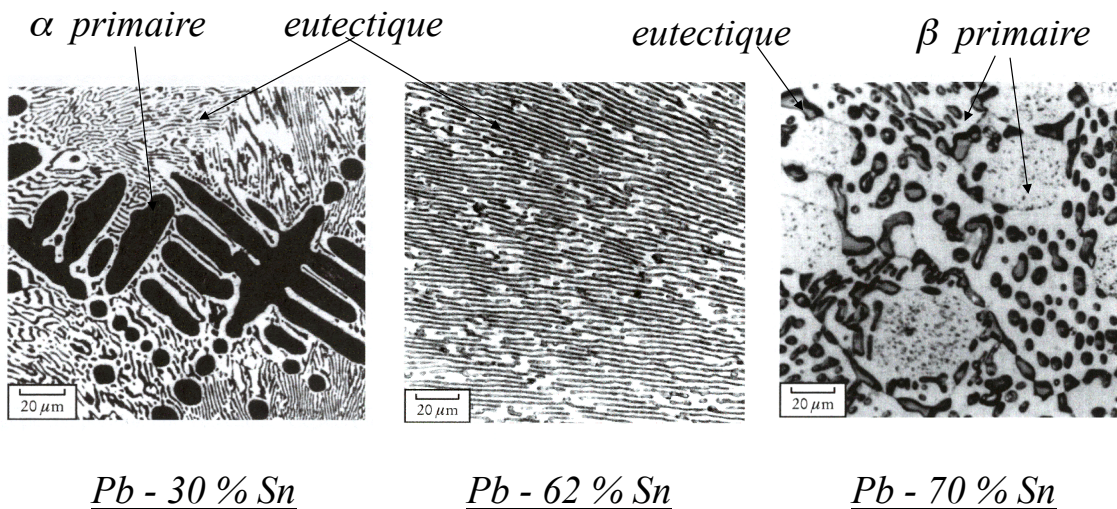
Figure 5.9 Micrographie d'un alliage Pb-70 % Sn. Le constituant β primaire apparaît en pâle.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-39

Micrographie Pb-Sn



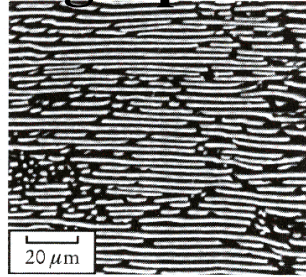
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-40

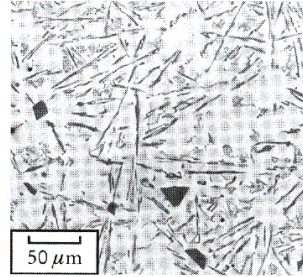
Micrographie des divers eutectiques

Lamellaire
Al-Al₂Cu



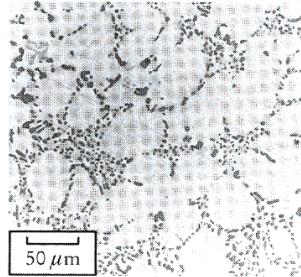
(a)

Aciculaire
Al-Si



(b)

T_f basse



(c)

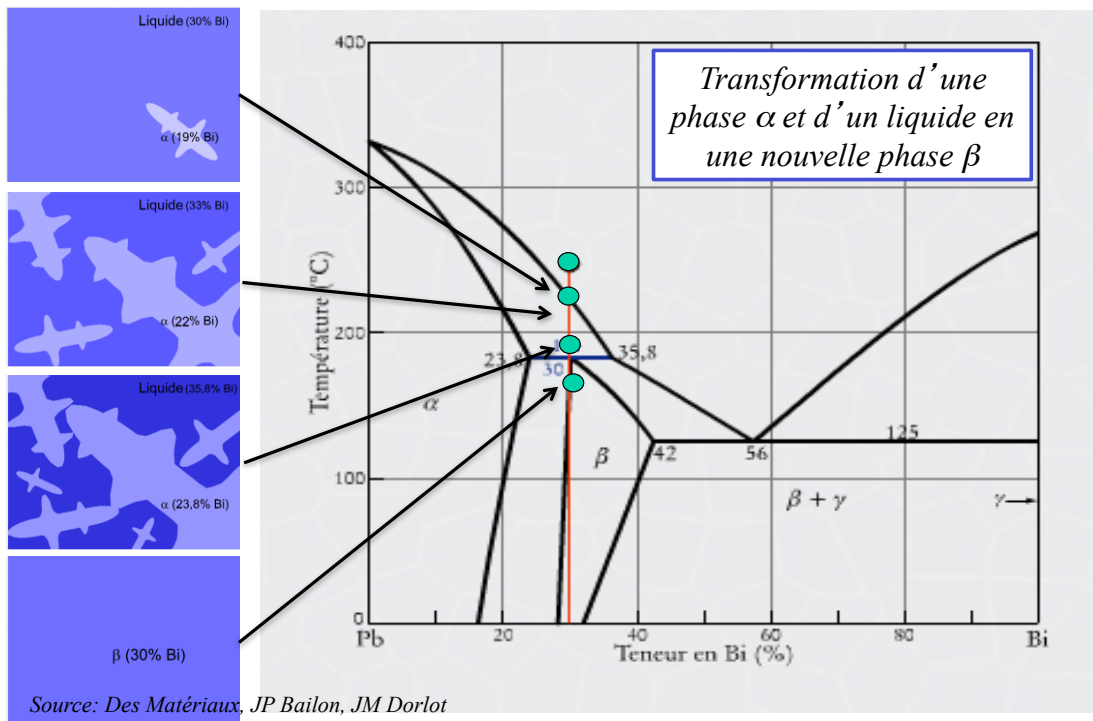
Globulaire
Al-Si + Na

Figure 5.11 Micrographies de divers eutectiques : a) Al-Al₂Cu, eutectique lamellaire ; b) Al-Si, eutectique aciculaire ; c) Al-Si (modifié Na) ; l'addition de Na dans le liquide modifie la morphologie de l'eutectique et permet d'obtenir un eutectique globulaire.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

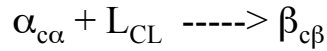
J-41

Transformation péritectique



Transformation péritectique

Transformation
d'une phase α et
d'un liquide en une
nouvelle phase β



$184^\circ - d\theta$
Nouvelle phase
 β (30 % Bi)

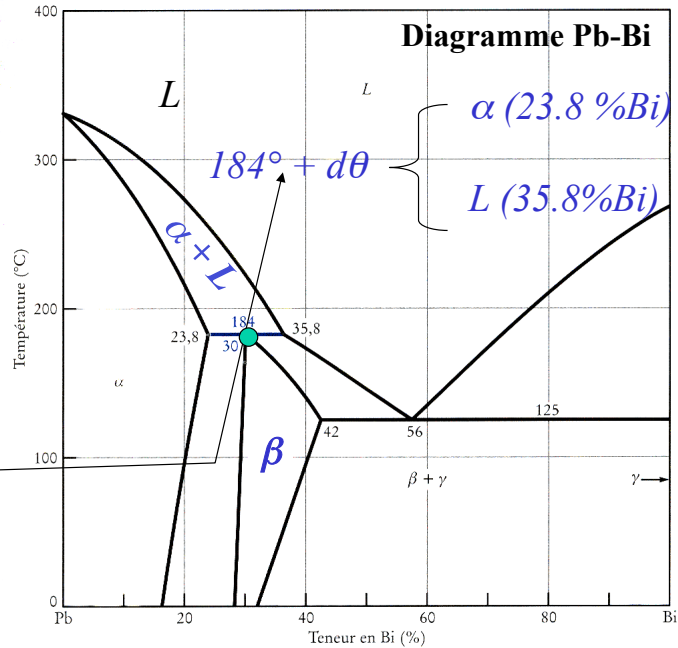


Figure 5.12 Diagramme d'équilibre Pb-Bi. À 184 °C et à 30 % Bi correspond la réaction péritectique. Ce système présente également une transformation eutectique pour une composition de 56 % Bi.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Exercices

Répondez à ces questions en utilisant le diagramme Pb-Bi.

Quelle est la solubilité maximale de Pb dans Bi?

% Pb dans Bi

Quelle est la solubilité maximale de Bi dans Pb?

% Bi dans Pb

Dans le cas d'un alliage contenant 50% Bi, on vous demande la composition et la proportion des phases en équilibre à 126°C.

Proportion : L: % Bi

β : % Bi

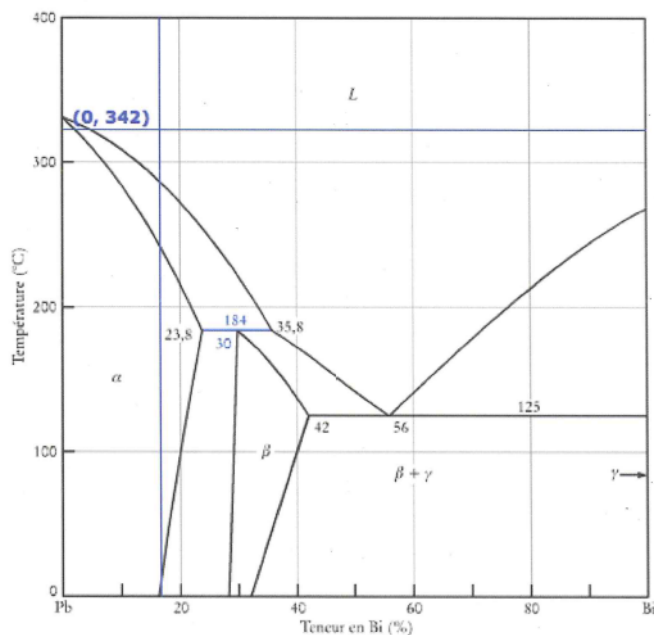
Composition : L: %m

β : %m

Calculez la proportion de constituant eutectique dans cet alliage (50% Bi) à 124°C.

%m

Exercices



MEC-200 – Technologie des matériaux

9-45

EXERCICE 5-8

Considérez le diagramme d'équilibre cadmium – plomb (Cd-Pb).

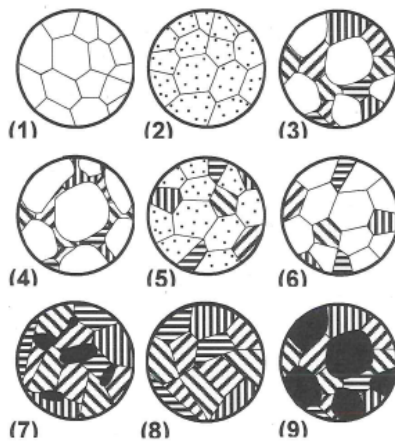
- Quelle est la valeur (en %m.) de la solubilité maximale du plomb dans le cadmium à l'état solide ?
- Quelle est la composition nominale C_0 (en %m de Pb) d'un alliage contenant 50 %m de constituant eutectique et 50 %m de phase β ?

On élabore trois alliages **A**, **B** et **C** dont la composition respective est la suivante :

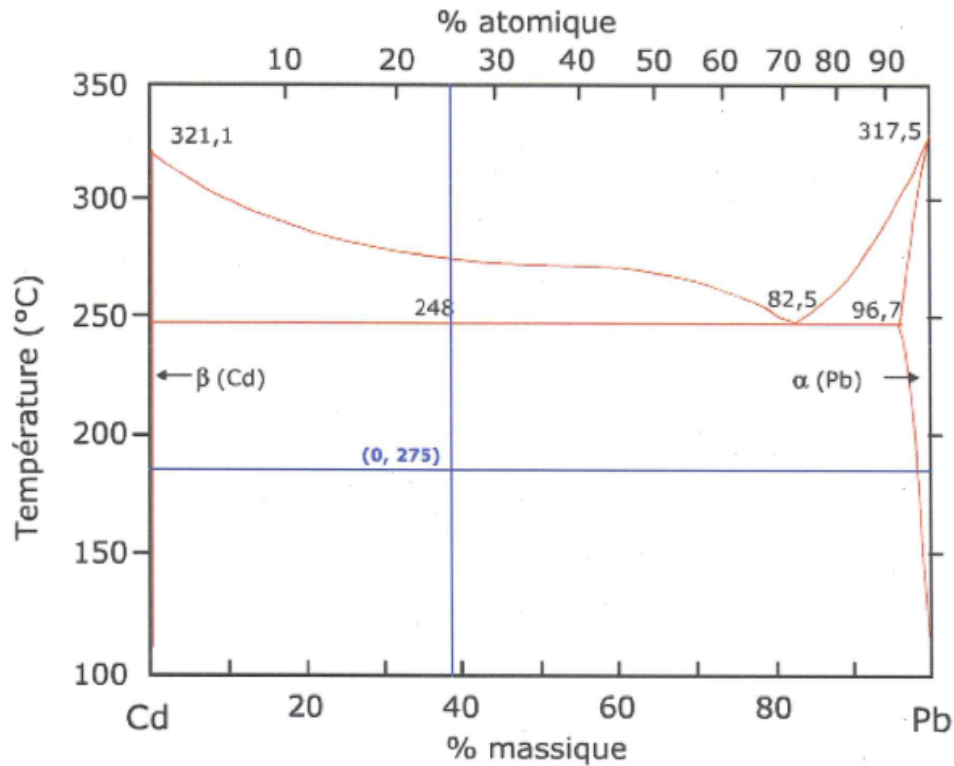
A = 96 %m Pb **B** = 94 %m Pb **C** = 43 %m Pb

Ces alliages sont refroidis à l'équilibre jusqu'à 20 °C. On fait alors des observations métallographiques sur chacun de ces alliages, le réactif d'attaque noircissant une des phases présentes.

- Grâce aux schémas de microstructure représentés ci-dessous, identifiez la phase qui a été noircie par le réactif d'attaque et associez un schéma à chacun des alliages **A**, **B** et **C**.



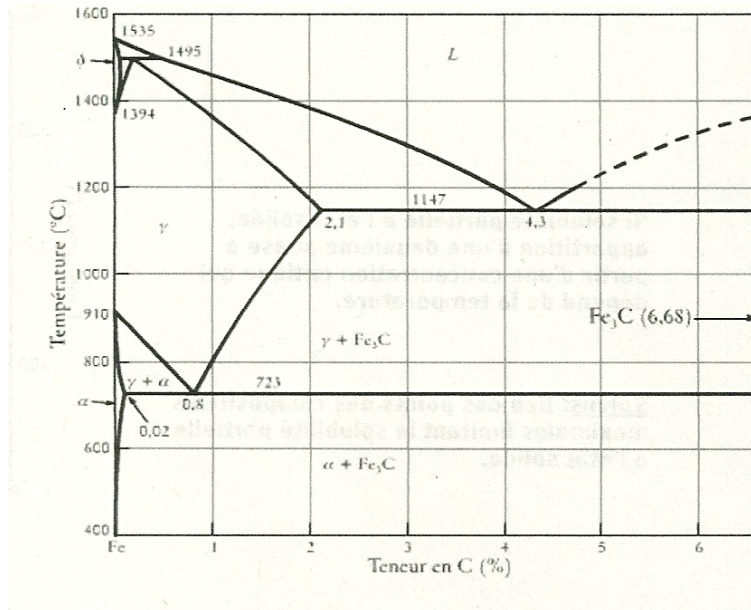
9-46



Contenu

- Introduction
- Définitions :
 - Composant, phase, constituant, limite de solubilité.
- Diagrammes binaires d'équilibre
 - Interprétation,
 - Règles des phases,
 - Règle des bras de levier, des segments inverses,
 - Transformations eutectiques, peritectiques, eutectoides,
 - Formation de la microstructure dans les alliages.
- **Système fer-carbone**
 - Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C,
 - Formation des microstructures : alliages Fer-carbone.
- Diffusion
- Diagrammes hors équilibre

Le diagramme de phase Fer-Carbone



1. Pourquoi C % n'est-il reporté que jusqu'à 6.7 %?
2. A 6.7 % Cémentation.
3. Revenons y après.
4. 0 % de C.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-49

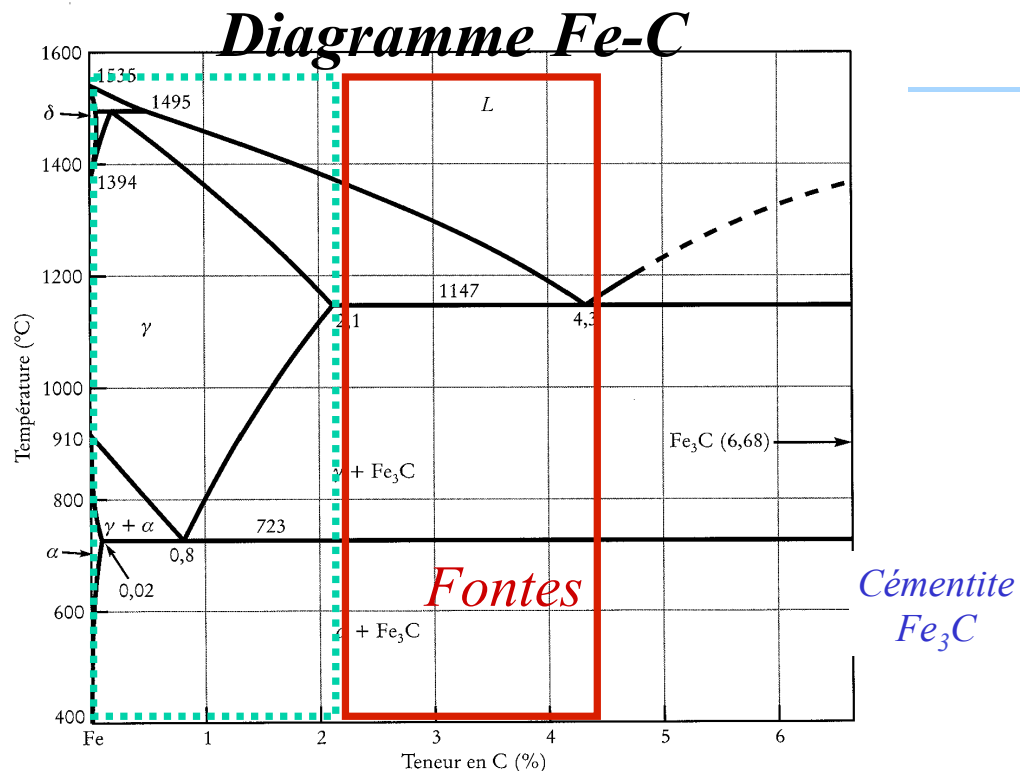


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre entre le fer et la cémentite Fe_3C .

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

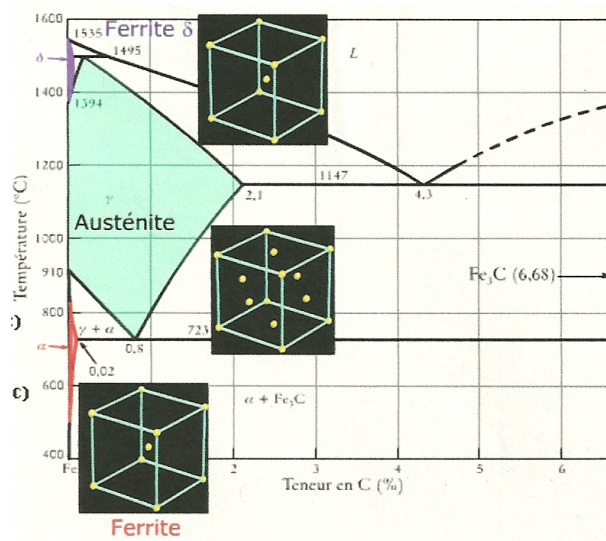
9-50

Diagramme Fe-C

0 % de Carbone

TRANSFORMATION ALOTROPIQUE

- Jusqu'à 912°C fer est CCC
Ferrite
 $Fe-\alpha$: CCC
- Entre 912°C et 1394°C fer est CFC
Austénite
 $Fe-\gamma$: CFC
- Entre 1394°C et 1538°C fer est CCC
Ferrite
 $Fe-\delta$: CCC
- Le fer CCC (fer α) est attiré par les aimants (ferromagnétique) (jusqu'à 770°C)



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

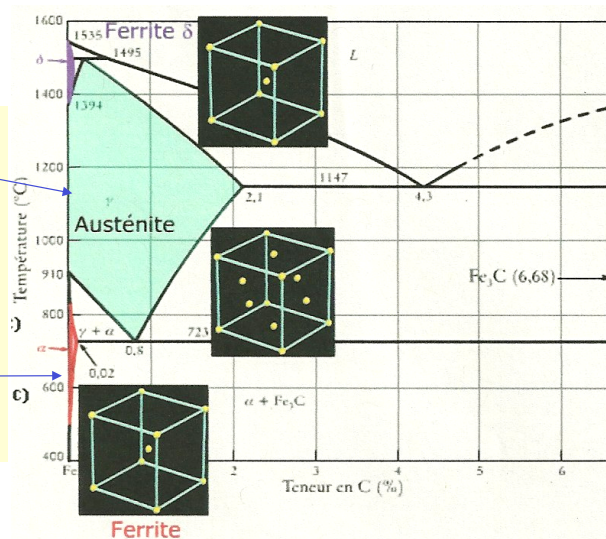
9-51

Diagramme Fe-C

C dans le fer

Entre 912°C et 1394°C fer est CFC
 $Fe-\gamma$: CFC
Solubilité maximale de C de 2.14 %

Jusqu'à 912°C fer est CCC
 $Fe-\alpha$: CCC
Solubilité maximale de C de 0.022 %

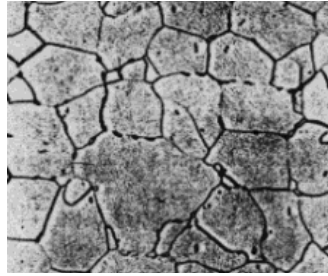


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-52

La ferrite



ferrite granulaire

Solution solide de carbone dans le fer (cc).

0.008 % de carbone à température ambiante et environ 0.025 % de carbone à 720°C.

Ductile et malléable :

80 à 100 HV, $R_m = \sim 300\text{Mpa}$ et un $A\% = \sim 35\%$.

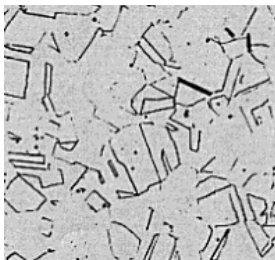
La ferrite est magnétique jusqu'à 770 °C (point de curie).

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-53

AUSTÉNITE



*Microstructure
de l'austénite*

Solution solide de carbone dans le fer gamma (γ).

Elle est très ductile entre 22 et 31 HR_C.

*La quantité de carbone atteint 1.7 % à 1145°C, **ce** constituant **n'existe pas à la température ordinaire**, il est stable qu'à haute température.*

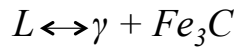
*Il ne peut exister à la température ambiante que par un maintien hors équilibre à la faveur d'éléments d'alliages dit gammagènes (ex. Ni et Mn). **C'est le cas des aciers austénitiques.***

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

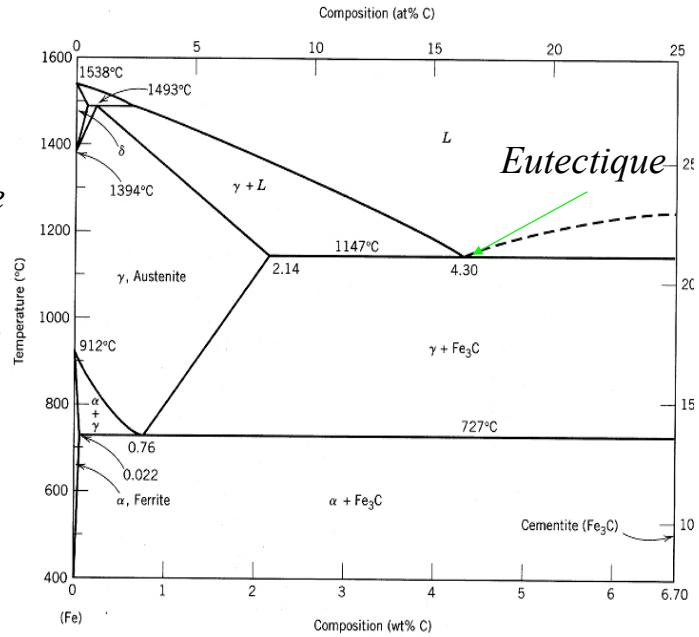
9-54

Diagramme Fe-C



Fe_3C : Cementite
Céramique dure, fragile
 T_f élevée
Structure non stable
Si maintenue longtemps
à haute température C
précipite

Com Si precipita C

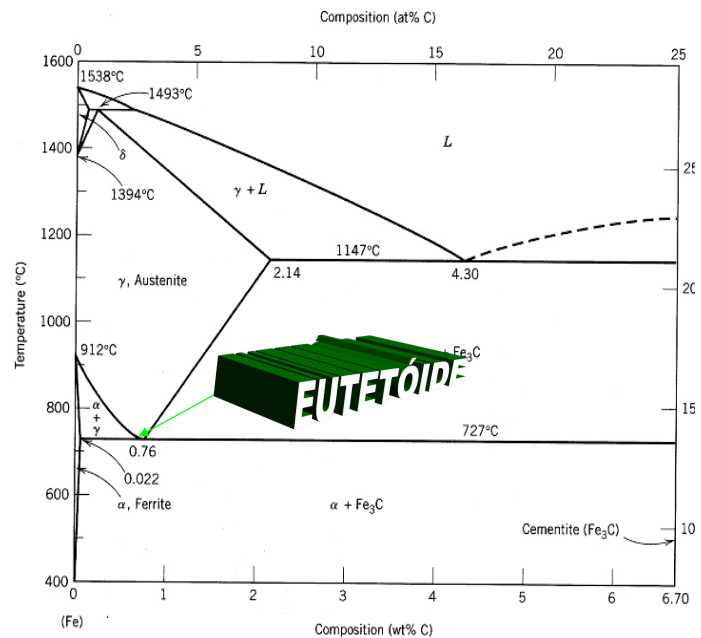
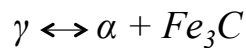


Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-55

Diagramme Fe-C

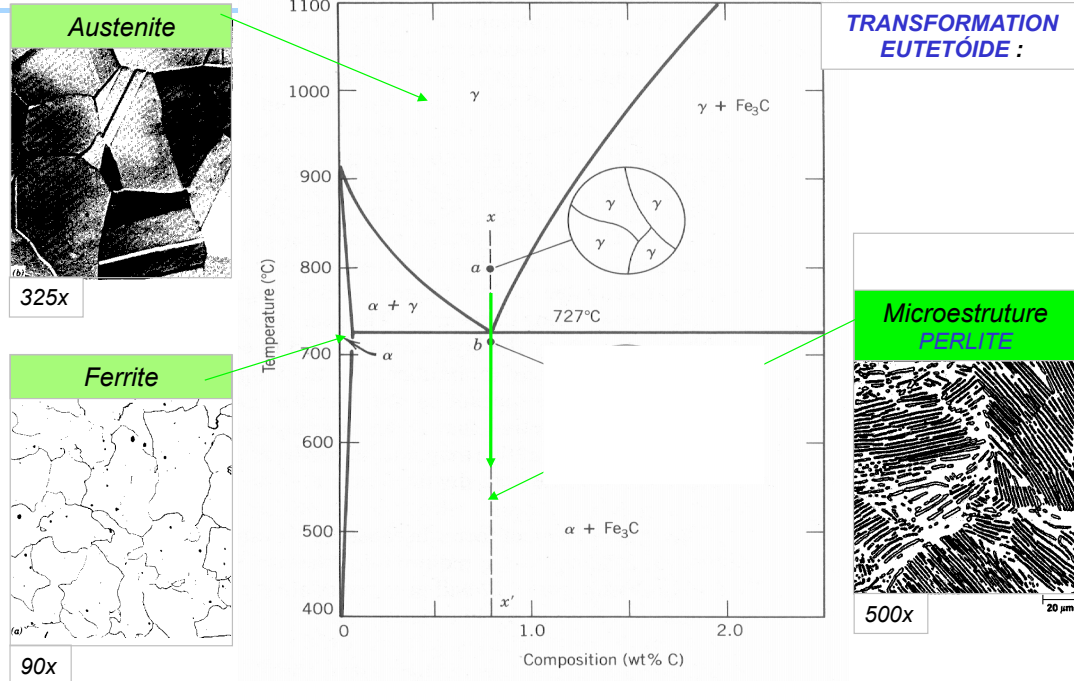


Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-56

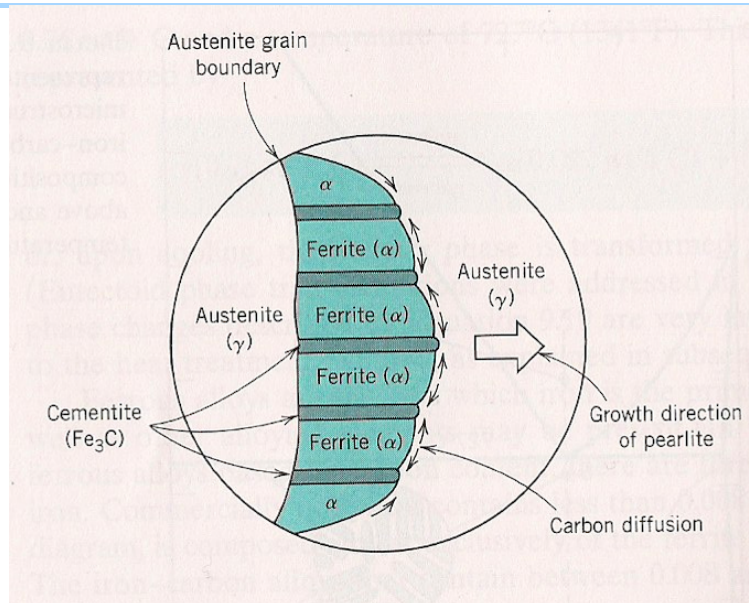
Diagramme Fe-C



Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister
MEC-200 – Technologie des matériaux

9-57

58



$\gamma : 0.76 \% \text{ C}$
 $\alpha : 0.022 \% \text{ C}$
 $\text{Fe}_3\text{C} : 6.7 \% \text{ C}$

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister
MEC-200 – Technologie des matériaux

9-58

Formation de la perlite

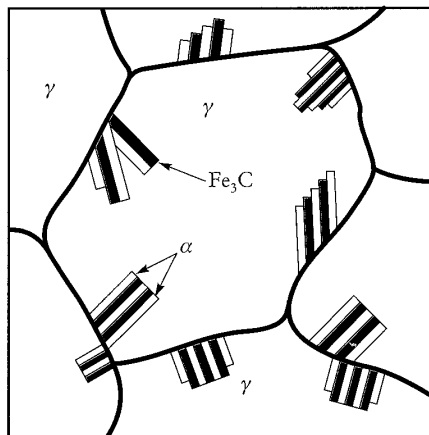


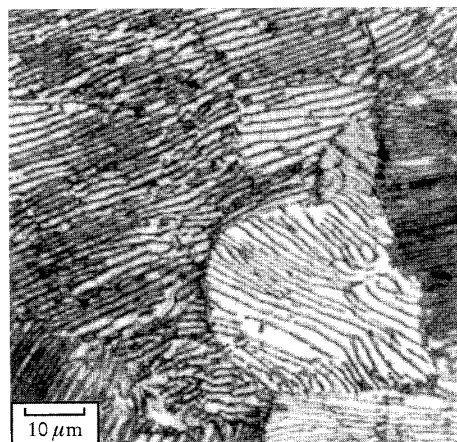
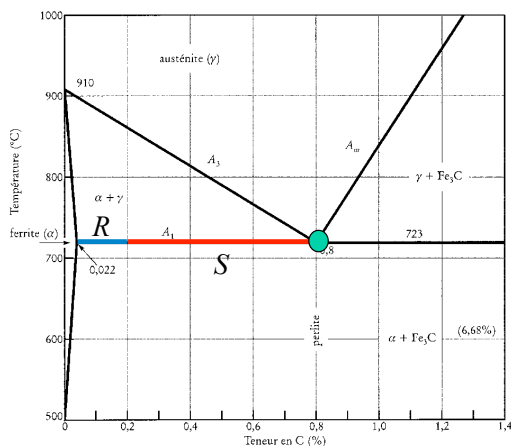
Figure 6.19 Formation de la perlite à partir des joints de grains austénitiques. La teneur en carbone de l'austénite γ est de 0,8 %, celle de la ferrite α de 0,02 %, et celle de la cémentite (Fe_3C) de 6,7 %. La formation et la croissance de la perlite requièrent donc la redistribution par diffusion du carbone en avant du front de transformation.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-59

Microstructures d'alliages Fe-C



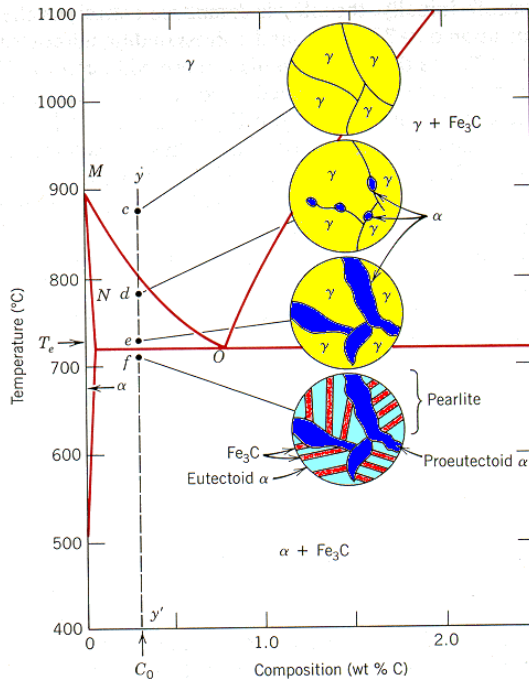
0.8 % C; 100 % perlite;
lamelles alternées de ferrite
et de cémentite

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-60

Microstructures d'alliages Fe-C



Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

MEC-200 – Technologie des matériaux

Point c : Polycrystal d'Austenite (γ) CFC

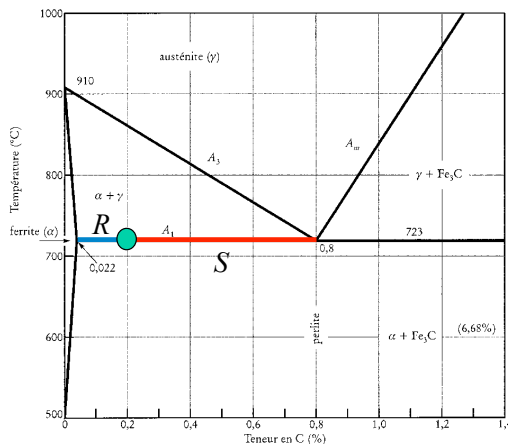
Ponto d : Nucleation et croissance de ferrite (α - CCC) aux contours de grains de l'austenite (γ - CFC).

Ponto e : Croissance de la ferrite

Ponto f : Croissance de la perlite
À partir de l'austénite

9-61

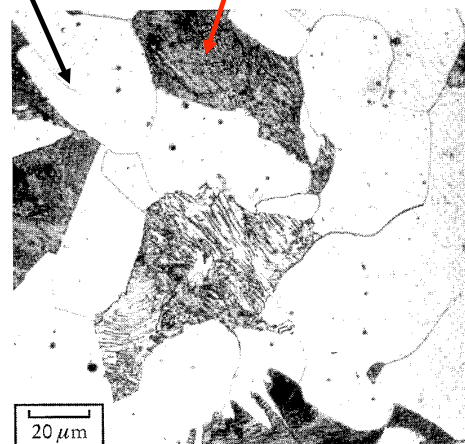
Microstructures d'alliages Fe-C



$$f_1 = \frac{S}{S+R} = \frac{0.8-0.2}{0.778} = 0.77 \text{ (ferrite)}$$

$$f_2 = \frac{R}{S+R} = \frac{0.2-0.022}{0.778} = 0.23 \text{ (perlite)}$$

a pro-eutectoïde Perlite (α + Fe₃C)



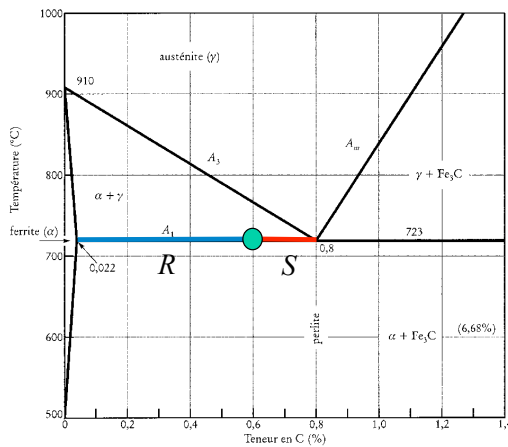
0.2 % C; 23 % perlite;
77 % ferrite pro-eutectoïde

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

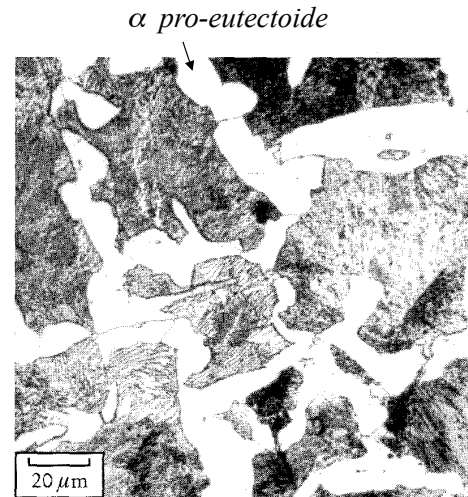
9-62

Microstructures d'alliages Fe-C



$$f_1 = \frac{S}{S+R} = \frac{0.8-0.6}{0.778} = 0.25 \text{ (ferrite)}$$

$$f_2 = \frac{R}{S+R} = \frac{0.6-0.022}{0.778} = 0.75 \text{ (perlite)}$$



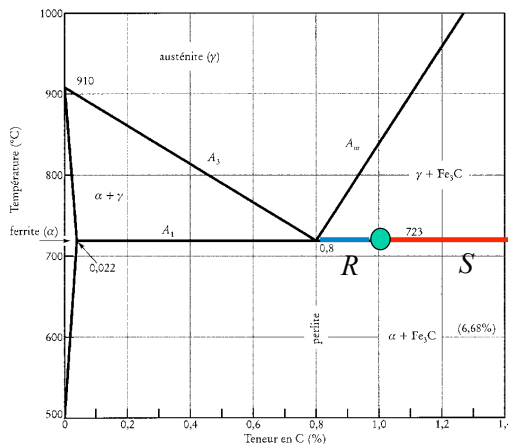
0.6 % C; 75 % perlite;
25 % de ferrite pro-eutectoïde

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

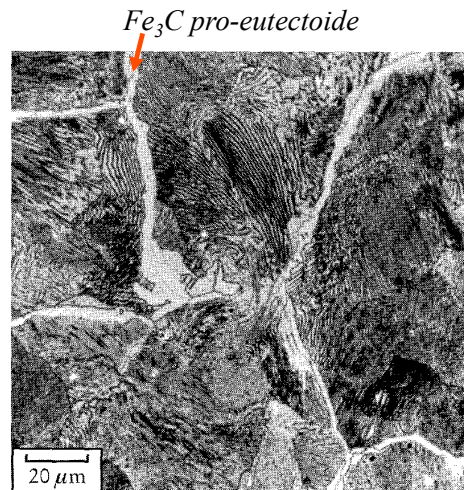
9-63

Microstructures d'alliages Fe-C



$$f_1 = \frac{S}{S+R} = \frac{6.68-1}{6.68-0.8} = 0.97$$

$$f_2 = \frac{R}{S+R} = \frac{1-0.8}{6.68-0.8} = 0.03$$



1.0 % C, 97 % perlite;
3 % de cémentite le long
des joints de grains γ

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-64

Exercices

EXERCICE 5-11

Considérez un acier contenant 0,6 %m. de carbone et qui se solidifie à l'équilibre. Répondez aux questions suivantes en utilisant le diagramme Fe – C (fig. 5.16 du livre *Des Matériaux* ou l'annexe « Diagrammes et figures » du didacticiel).

- Quel est le type de cet acier ?
- Quel est l'intervalle de solidification $\Delta\theta$ (en °C) de cet acier ?
- À quelle température apparaît la ferrite au cours du refroidissement ?
- À 722 °C, quelles sont les phases de cet acier, leur composition et leur proportion ?
- À 722 °C, quels sont les constituants de cet acier, leur composition et leur proportion ?

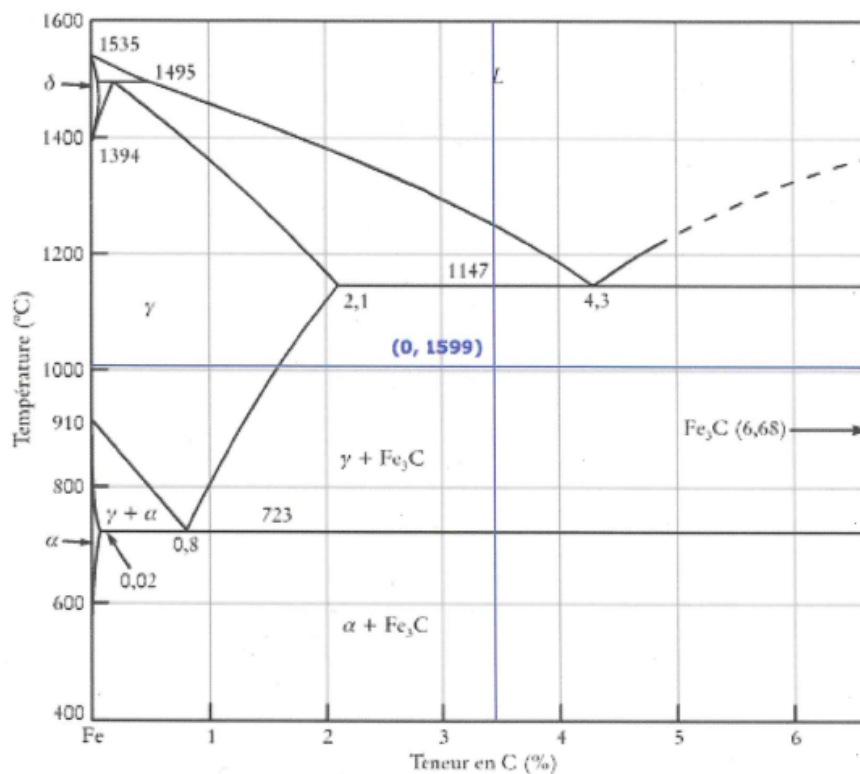




Diagramme d'équilibre

Effets du temps

Contenu

- Introduction
- Définitions :
 - Composant, phase, constituant, limite de solubilité.
- Diagrammes binaires d'équilibre :
 - Interprétation,
 - Règle des phases,
 - Règle des bras de levier, des segments inverses,
 - Transformations eutectiques, peritectiques, eutectoides,
 - Formation de la microstructure dans les alliages.
- Système fer-carbone :
 - Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C,
 - Formation des microstructures: alliages Fer-carbone.
- Diffusion
- Diagrammes hors équilibre

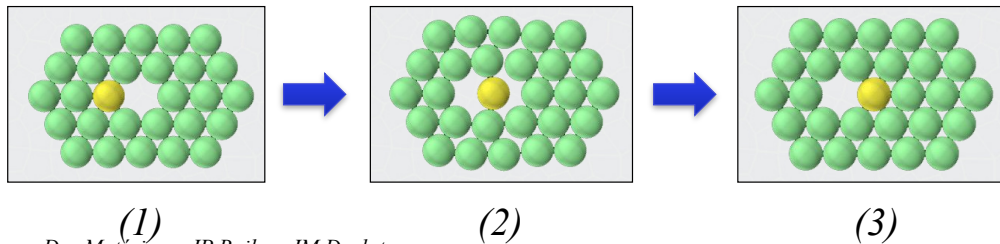
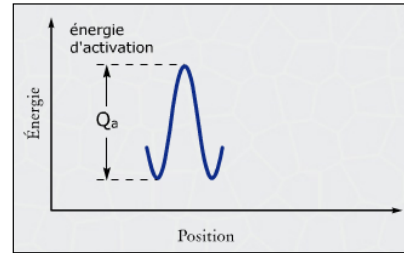
Solution solide de substitution ou d'insertion

La diffusion est possible grâce à la présence de **lacunes** (défauts ponctuels), le nombre de lacunes est définies par :

$$n = N \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \rightarrow \text{Le nombre de lacunes est dépendant de la température}$$

Pour qu'un atome diffuse :

- 1- Présence de lacunes,
- 2- Acquiert l'énergie nécessaire pour déformer locale le réseau et ainsi se déplacer vers la lacune (3).



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-69

Loi de la diffusion

La diffusion est possible grâce à la présence de **lacunes** (défauts ponctuels).

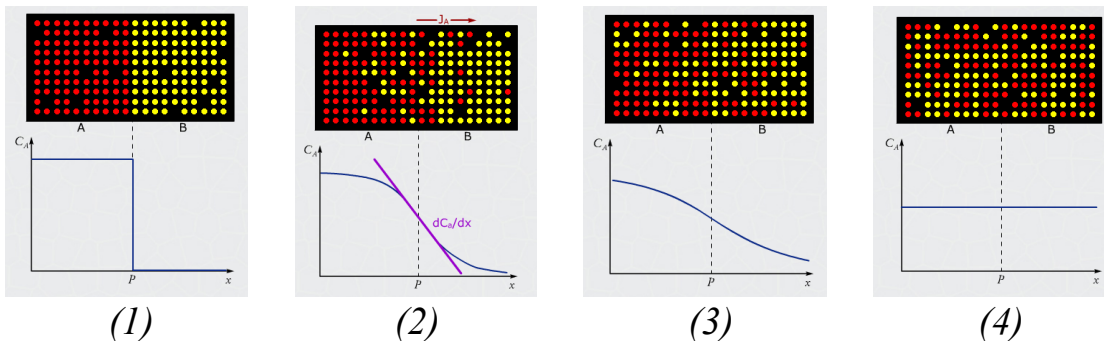
Au cours du temps, le profil de concentration des éléments se modifie.

Le flux d'atomes A diffusant dans B peut être défini par :

$$J_A = -D_A \frac{dC_A}{dx} \quad (1^{\text{ère}} \text{ loi de Fick})$$

D_A : Coefficient de diffusion (m^2/s) de A dans B

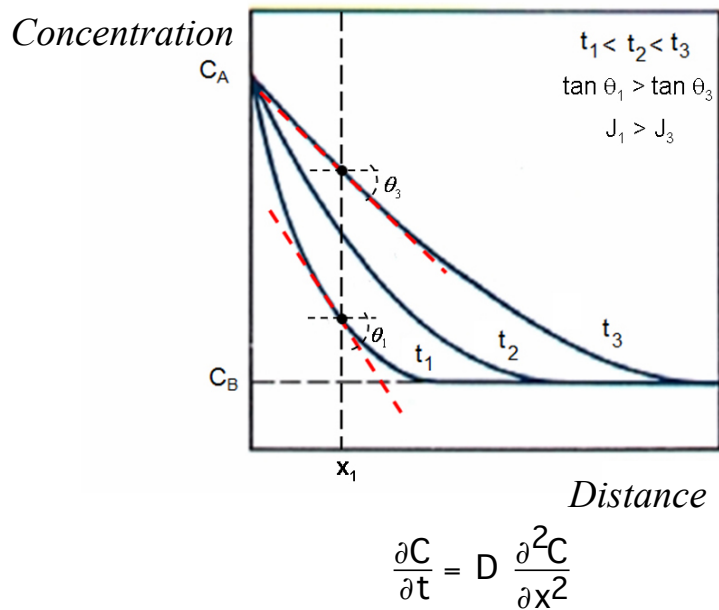
$\frac{dC_A}{dx}$: Gradient de concentration de A à l'interface P



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-70



Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

MEC-200 – Technologie des matériaux

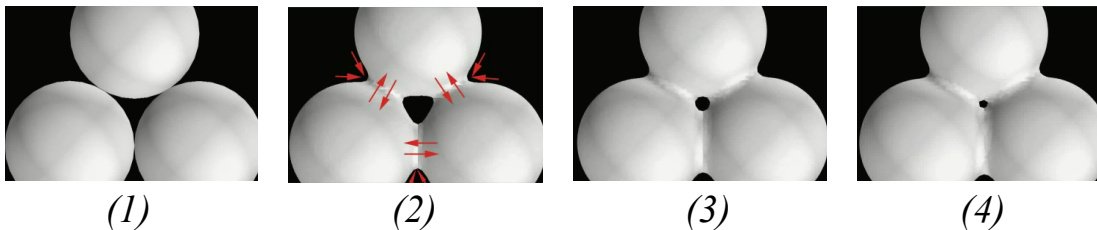
9-71

Applications de la diffusion

Traitements thermiques

Soudage et brasage

Frittage : Établissement de liaisons entre des particules de poudres portées à haute température par diffusion en volume et en surface.

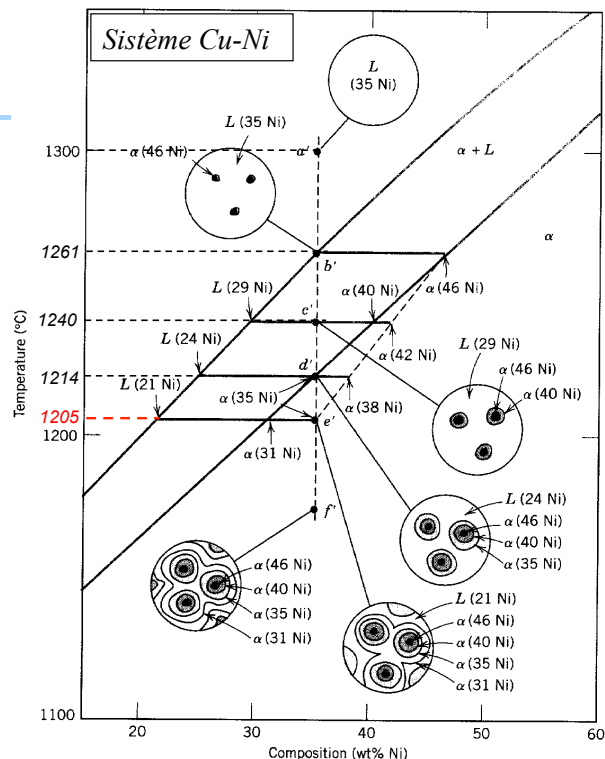
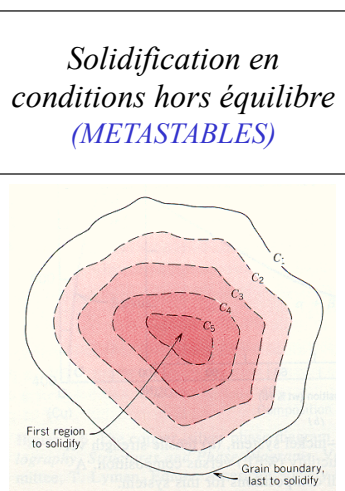


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

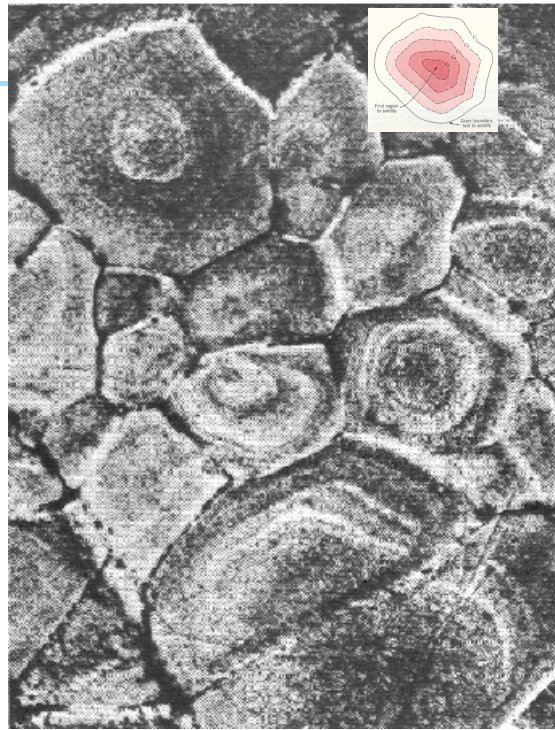
9-72

- Introduction
- Définitions :
 - Composant, phase, constituant, limite de solubilité.
- Diagrammes binaires d'équilibre
 - Interprétation,
 - Règle des phases,
 - Règle des bras de levier, des segments inverses,
 - Transformations eutectiques, peritectiques, eutectoides,
 - Formation de la microstructure dans les alliages.
- Système fer-carbone
 - Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C,
 - Formation des microstructures : alliages Fer-carbone.
- Diffusion
- Diagrammes hors équilibre



CONSEQUENCE :

- Segregation.
- Reduction de T_{solidus} .
- Dégradation des propriétés.
- Nécessité d'homogénéisation.



Alliage de Zn et Zr (400X)

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

MEC-200 – Technologie des matériaux

9-75

Que faut-il retenir?

- Phases, compositions
- Règle du bras de levier
- Formation de microstructure
- Morphologies eutectiques, peritectiques, eutectoides
- Diagramme Fe-C
- Effet du temps
- Diffusion